

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Bakalářská práce

2020

Ondřej Hrubý

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Návrh efektivního postupu přesného broušení

Design of Efficient Precision Grinding Procechure

Student:

Ondřej Hrubý

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.

Ostrava 2020

Zadání bakalářské práce

Student:

Ondřej Hrubý

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

Návrh efektivního postupu přesného broušení
Design of Efficient Precision Grinding Procedure

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Obecná charakteristika daného problému.
2. Obecná problematika broušení.
3. Návrh nového postupu pro vybranou součást.
4. Diskuze experimentů.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Brno: MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

ČEP, R. TECHNOLOGIE II – 2. díl. Ostrava: Vysoká škola báňská – TU Ostrava, 142 s. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf.

NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.

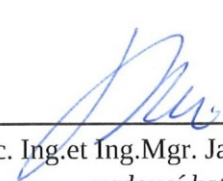
SHAW, M. C. *Metal Cutting Principles*. 2nd ed. Oxford University Press, 2005. 651 pp. ISBN 0-19-514206-3.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 18. 5. 2020


.....

podpis studenta

Prohlašuji že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo,
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3),
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO,
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 18. 5. 2020



.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Ondřej Hrubý

Adresa trvalého pobytu autora práce: Dobrovského 12, Šumperk 787 01

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

HRUBÝ, O. *Návrh efektivního postupu přesného broušení: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2019, 63 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.

Tato bakalářská práce se zabývá broušením na požadovaný tvar dle výkresu keramiky SiC. Úkolem je najít efektivní technologický postup, popřípadě vymyslet další postup a poté je mezi sebou srovnat.

Klíčová slova: broušení, keramika SiC, broušení keramiky

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

HRUBÝ, O. *Design of Efficient Precision Grinding Procedure: bachelor thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Working and Assembly, 2019, 63 p. Thesis head: doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.

This bachelor thesis focuses on grinding ceramic SiC into requested shape according to a mechanical drawing. The task aims at finding an efficient technological procedure or optionally devise an alternative one and then compare them with each other.

Key words: grinding, ceramic SiC, grinding of ceramic

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLU	10
1 Úvod	11
2 Obecná charakteristika daného problému	12
2.1 Historie filmy KOVO Dohnalík	12
2.2 ISO 9001	12
2.3 Neoxidová keramika.....	13
2.4 Karbid křemíku	13
2.5 Keramika SSiC	14
2.6 Keramika SiSiC	15
2.7 Vlastnosti a porovnání karbidických keramik	16
3 Obecná problematika broušení	17
3.1 Broušení [4]	17
3.2 Charakteristické znaky procesu broušení [4]	17
3.3 Druhy broušení v závislosti na tvaru obrobku [4]	19
3.4 Axiální obvodové broušení vnějších ploch „dokulata“ [4]	21
3.4.1 Popis procesu obrábění [4].....	21
3.5 Hlubkové obvodové broušení vnějších ploch „dokulata“ [4]	22
3.6 Radiální (zapichovací) obvodové broušení vnějších ploch „dokulata“ [4]	22
3.7 Obvodové axiální broušení vnitřních ploch a „dokulata“ [4]	23
3.8 Planetové broušení [4]	24
3.9 Broušící kotouče s diamantovým a KNB brusivem.....	25
3.10 Charakteristiky broušícího kotouče [5]	25
4 Návrh nového technologického postupu.....	28
4.1 Experimentální technologické postupy.....	28
4.2 Volba kotouče a technických parametrů	29
4.2.1 Volba kotouče na broušení vnějšího průměru a čel.....	29
4.2.2 Volba kotoučku na broušení vnitřních průměrů	29
4.2.3 Univerzální broušící parametry	29
5 Diskuze experimentu.....	30

5.1 Broušení v dlouhých čelistech	30
5.1.1 Lepení podložek na upínací hlavu	30
5.1.2 Broušení podložek	31
5.1.3 První operace broušení čel obrobku	32
5.1.4 Druhá operace broušení vnitřního průměru	34
5.1.5 Třetí operace broušení vnějšího průměru	35
5.1.6 Doplnkové operace	36
5.1.7 Kontrola kusu	36
5.2 Broušení na přípravku	37
5.2.1 Lepení a první operace broušení čel na podložkách	37
5.2.2 Výroba přípravku	38
5.2.3 Upevnění a vyrovnavání přípravku	39
5.2.4 Upnutí a vyrovnaní kusu	40
5.2.5 Druhá operace broušení vnějšího průměru	41
5.2.6 Třetí operace broušení vnitřního průměru	42
5.2.7 Kontrola kusu	43
5.3 Broušení na nárazecím trnu	43
5.3.1 První operace broušení díry	44
5.3.2 Modifikace stroje	44
5.3.3 Druhá operace broušení vnějšího průměru a čela	46
5.3.4 Třetí operace broušení posledního čela	47
5.4 Vyhodnocení experimentu	48
5.5 Aplikace technologického postupu	49
5.5.1 První operace broušení	49
5.5.2 Druhá operace broušení čel a vnějšího průměru	50
5.5.3 Zbytkové operace	52
5.5.4 Kontrola rozměrů	53
5.5.5 100% kontrola	54
6 Technicko – ekonomické projednání	55
7 Závěr	56

Poděkování.....	57
Použitá literatura.....	58
Seznam obrázků	59
Seznam tabulek	62
Seznam příloh.....	63

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLU

Symbol/Zkratka	Jednotka	Význam
mm	[mm]	milimetr
μm	[mm]	mikrometr
SIC	-	Karbid křemíku
SSIC	-	Slinutý karbid křemíku
SISIC	-	Karbid křemíku s infiltrovaný křemíkem
Al₂O₃	-	Oxid hlinitý
MPa	[MPa]	Megapascal
Ra	[μm]	Střední aritmetická hodnota drsnosti povrchu
n_w	[ot.min ⁻¹]	Otáčky obrobku
v_{fa}	[m.min ⁻¹]	Vodorovná obvodová rychlost
f_r	[mm]	Radiální posuv obrobku nebo kotouče
a_e	mm	Hloubka úběru
v_{pk}	[mm.min ⁻¹]	Obvodová rychlost
v_w	[mm.min ⁻¹]	Svislá obvodová rychlost
Rz	[μm]	Průměrná hodnota max. a min. naměřená v 5 bodech drsnosti povrchu

1 Úvod

Technická keramika se čím dál tím víc začíná uplatňovat ve strojírenství, díky svým vlastnostem jako je vysoká tvrdost, malá tepelná roztažnost ale i dokonce elektrická vodivost, se dostává na popředí používaných materiálů. Navzdory tomu, že se jedná o relativně nový materiál, našla si ve světě plno příznivců, kteří na ni nedají dopustit. Konkrétně se bude řešit keramika SIC a její následné modifikace, tato keramika má za surového tvaru šedý, až černý odstín a povrch je velmi hrbolatý, abychom docílili přesných rozměrů, je potřeba kus brousit, honovat popřípadě lapovat, po těchto operacích dostane nádherný tmavě černý lesklý odstín, který kromě přesných rozměrů u zákazníka hraje velmi důležitou roli.

V této bakalářské práci se bude řešit vhodný technologický postup pro broušení této keramiky. Díky hlavnímu zákazníkovi KYOCERA FINECERAMICS PRECISION GmbG SELB (dříve firma H. C. STARCK) existuje ve firmě KOVO Dohnalík určitá databáze technologických postupů, ovšem technické vybavení není na stejné úrovni jako u našeho německého partnera, tak je potřeba upravit postup, nebo úplně kompletně navrhnout nový, což může zahrnovat od výroby vlastních přípravků, koupi nového vybavení, až po samostatnou modifikaci strojů.

2 Obecná charakteristika daného problému

Technická keramika jako taková, patří mezi nejtvrďší materiály, z toho důvodu je její obrábění velmi náročné. Jedna z operací jak docílit rozměrově přesného finálního tvaru je broušení, kvůli vysoké tvrdosti se musí používat speciálních nástrojů jako brusných kotoučů s diamantovým brusivem. Tímto problémem se zabývá šumperská firma KOVO Dohnalík (dále jen SD KOVO), která brousí všemožné druhy technické keramiky pro firmu KYOCERA FINECERAMICS PRECISION GmbH SELB.

2.1 Historie firmy KOVO Dohnalík

V roce 1993 založil firmu Stanislav Dohnalík senior s počátečním záměrem na výrobu náhradních dílů pro stroje a zařízení v dřevozpracujícím průmyslu. Počínaje rokem 2000 byl uskutečněn pronájem výrobního prostoru v Šumperku – rozšíření výrobních kapacit pro spolupráci s šumperskými firmami CeramTec Czech Republic s.r.o., SHM, s.r.o. a Platit a.s. V roce 2013 zahájil spolupráci s německou firmou H. C. STARCK (dnes už firma KYOCERA FINECERAMICS PRECISION GmbH SELB, k převzetí došlo touhle japonskou firmou začátkem února roku 2019) v oblasti broušení výrobků z technické keramiky. Poté během roku 2015 rozšířil výrobní prostory pro oblast kovovýroby a účastnil se dotačního programu EU a tím realizoval nákupy nových NC a CNC obráběcích strojů, měřidel a celou řadu příslušenství. V roce 2018 firma získala certifikaci dle ISO 9001: 2015 pro následující činnosti. [1]

2.2 ISO 9001

Certifikát ISO 9001 potvrzuje, že systém managementu kvality (Quality Management System) v dané organizaci odpovídá standardizovaným normám.



Obr. 2.2 Certifikace dle normy ISO 9001:2015 od firmy DNV GL

Ovšem, než budeme moci započít samotné broušení, musíme pochopit co ve skutečnosti technická keramika je, jaké má vlastnosti a úskalí, díky tomu poté můžeme určit vhodné brousící podmínky, vlastnosti kotouče jako jsou zrnitost, koncentrace brusiva a jaké zvolit vhodné pojivo. Všechny tyto aspekty by nás měly dovést do cíle v podobě úspěšného nabroušení kusu.

2.3 Neoxidová keramika

Neoxidová keramika se vyrábí výhradně ze syntetických materiálů. Termín neoxidová keramika se obecně týká karbidů, nitridů nebo oxyinitridů. Vyznačuje se svými neobvyklými vlastnostmi, čemuž vděčí vysokému podílu kovalentních vazeb v karbidových a nitridových krystalických strukturách. Suroviny musí být všeobecně velmi jemnozrné. Slinovací proces se realizuje ve vakuové peci, s ochrannou atmosférou inertního plynu při teplotách, které mohou dosahovat i přes 2000°C! [2]

2.4 Karbid křemíku

Zdaleka nejdůležitější karbidové keramiky jsou materiály, které se zakládají na bázi karbidu křemíku (SiC). Existují různé druhy keramiky, které se speciálně vyrábějí z důvodu konkrétního zaměření, ale všechny se vyznačují typickými vlastnostmi karbidu křemíku, jako jsou: [2]

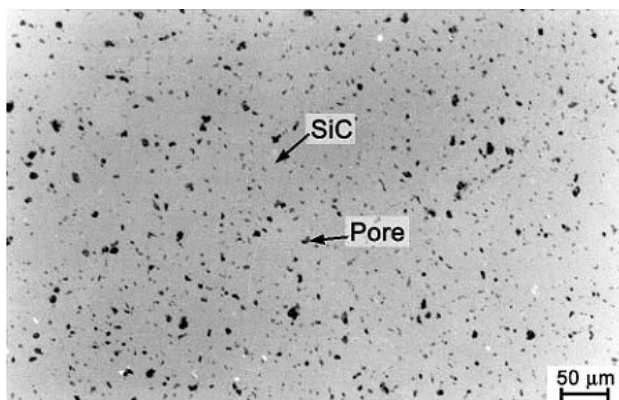
- velmi vysoká tvrdost,
- odolnost proti korozi i při vysokých teplotách,
- odolnost proti opotřebení,
- vysoká pevnost, dokonce i za vysokých teplot,
- dobrá odolnost proti teplotním rázům,
- nízká tepelná roztažnost,
- velmi vysoká tepelná vodivost,
- polovodivost.

2.5 Keramika SSiC

Slinutý karbid křemíku, známý jako SSiC se vyrábí se použitím velmi jemného prášku SiC (karbid křemíku), ve kterém jsou zahrnuty přísady na slinování. Keramika je vyráběna formováním, které je stejné jako pro ostatní druhy keramiky a je slinovaná za teplot 2000 °C až 2200 °C v inertní ochranné atmosféře. Kromě jemnozrnného druhu, kde se velikost zrn pohybuje do 5µm, je k dispozici i druh s hrubozrnnou strukturou s velikostí zrna až 1,5 mm. Keramika SSiC se vyznačuje vysokou pevností, kterou si zachovává téměř konstantní až do velmi vysokých teplot, které se pohybují v průměru 1600 °C [2]

Tento keramický materiál vykazuje extrémně vysokou odolnost proti korozi v kyselém a zásaditém prostředí, a tuto vlastnost si ponechává do již zmíněných vysokých teplot. Druh s hrubozrnnou strukturou nabízí speciální výhody. Tyto vlastnosti jsou vynikající mezi vysokoteplotní keramikou a jsou doplněny vysokou odolností proti teplotním rázům, vysokou tepelnou vodivostí, vysokou odolností proti opotřebení a tvrdostí, která se blíží tvrdosti diamantu. Proto tento materiál je ideální pro extrémně náročné podmínky, jako jsou: [2]

- těsnicí kroužky v chemických čerpadlech,
- ložisková pouzdra,
- vysokoteplotní hořákové hubice,
- podkladové stojany do pecí pro velmi vysoké teploty.



Obr. 2.50 Mikrostruktura SSiC (neleptaný) [3]



Obr. 2.51 Hrubozrnná mikrostruktura SSiC (leptaný) [3]

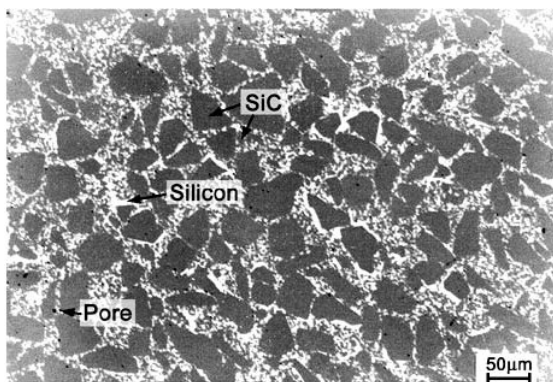
2.6 Keramika SiSiC

Reakčně vázaný karbid křemíku s infiltrovaným křemíkem (SiSiC) se skládá přibližně z 85 až 94% karbidu křemíku (SiC) a zbytek je 15 až 6% kovový křemík. Tato keramika nemá prakticky žádnou zbytkovou porozitu. [2]

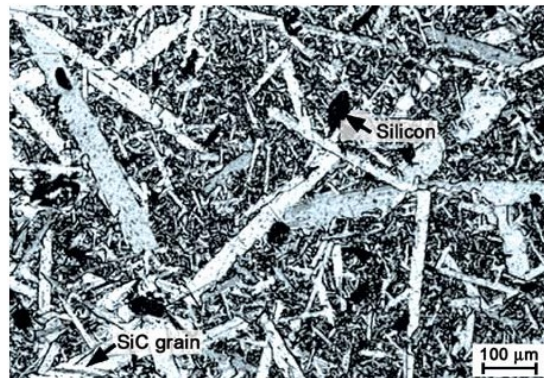
Toho je dosaženo infiltrací vytvořené části karbidu křemíku a uhlíku s kovovým křemíkem. Reakce mezi tekutým křemíkem a uhlíkem vede k vazbě SiC mezi zrna SiC a zbývající objem pórů je zaplněn kovovým křemíkem. Výhodou této techniky je to, že oproti technologii slinování, nedochází během procesu infiltrace ke smrštění. Tímto způsobem lze vyrobit neobvykle velké díly a to dokonce s velmi přesnými rozměry. Ovšem je zde jisté pracovní omezení okolo teploty 1380° C kvůli teplotě tavení tekutého křemíku. Navzdory tomu i pod touto teplotou vykazuje keramika SiSiC velmi vysokou pevnost, odolnost proti korozi, dobrou odolnost proti neplotním rázům a odolnost proti opotřebení. SiSiC je tedy ideální materiál pro: [2]

- podkladové stojany do pecí (nosníky, podpěry),
- různé části hořáků pro přímé či nepřímé spalování.

Taky je velmi užitečný u strojních částí, kde je vyžadována vysoká odolnost proti opotřebení, nebo proti korozi, příkladem může být těsnící kroužek.



Obr. 2.60 Mikrostruktura SiSiC [3]



Obr. 2.61 Mikrostruktura hrubozrnného SiSiC [3]

2.7 Vlastnosti a porovnání karbidických keramik

			LPSiC	SSiC	SiSiC	RSiC	NSiC
Mechanické vlastnosti	Symbol	Jednotky	Liquid-phase sintered silicon carbide	Sintered silicon carbide	Silicon-infiltrated silicon carbide	Re-crystallised silicon carbide	Nitride bonded silicon carbide
Porozita	-	[Objem %]	<1	0	0	10 - 15	10 - 15
Hustota, min.	ρ	[g/cm ³]	3,20 – 3,24	3,08 – 3,15	3,05 – 3,12	2,6 – 2,8	2,7 - 2,82
4-bodová pevnost v ohybu	σ_B	[MPa]	600	260 – 5 00	180 – 450	80 – 120	180 – 200
Modul pružnosti	E	[GPa]	420	350 – 450	270 – 400	230 – 280	150 – 240
Tvrdost	HV ₁₀	[GPa]	22	23 – 26	14 – 25	25	-
Faktor intenzity napětí	K _{IC}	[MPa \sqrt{m}]	6,0	3,0 – 4,8	3 – 5	3 – 4	-
Weibullův modul	m	[-]	10 – 15	9 – 19	14 – 16	10 – 12	10 – 12
Elektrické vlastnosti							
Měrný odpor při 20°C	$\rho_{V>20}$	[Ωm]	$10^3 - 10^4$	$10^3 - 10^4$	$10^1 - 10^3$	-	-
Měrný odpor při 600°C	$\rho_{V>60}$	[Ωm]	10^1	10^1	5	-	-
Termické vlastnosti							
Teplotní délková roztažnost	α 30-1000	[$10^{-6} K^{-1}$]	4,1	4,0 – 4,8	4,0 – 4,8	4,7 – 4,8	4,5
Měrná tepelná kapacita	C _p 30-1000	[Jkg ⁻¹ K ⁻¹]	600	600 – 1000	650 – 1300	600 – 900	800 – 900
Tepelná vodivost	λ 30-100	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]	100	40 – 120	100 – 160	18 – 20	14 – 15
Odolnost proti teplotním rázům	-	Hodnocení	Dobrá	Dobrá	Velmi dobrá	Velmi dobrá	Velmi dobrá
Maximální teplota použití	T	[°C]	1200 – 1400	1400 – 1750	1380	1600	1450

Tabulka 2.70 Vlastnosti karbidických keramik [2]

3 Obecná problematika broušení

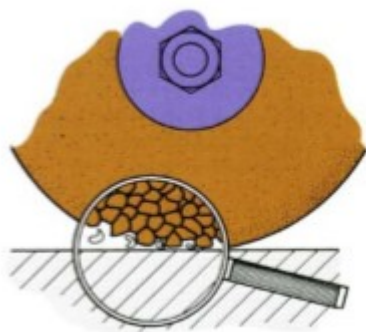
Broušení je dokončovací operace pro technickou keramiku, úkol této operace je dát finální tvar surovému polotovaru, v této fázi může vznikat problém a to ten, že každý polotovar může mít jiné rozměry než předchozí, v lepším případě, než předchozí zakázka, tudíž je potřeba správně zvolit brousící parametry, aby nedošlo ke zničení kusu nebo v horším případě ke zničení celého stroje.

3.1 Broušení [4]

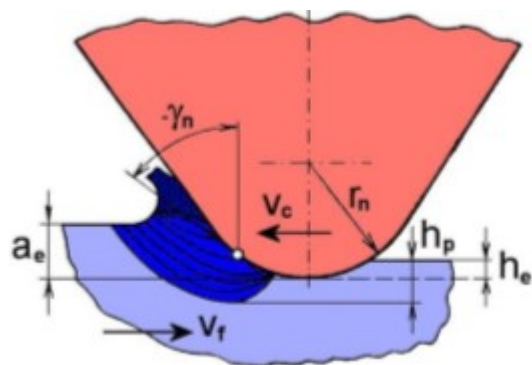
Je hlavní dokončovací metoda, která umožňuje získat vysokou přesnost obrobené plochy. Jedná se tedy o metodu obrábění mnohobřitým nástrojem, který nemá jasně definovanou geometrii řeznými hranami (zrna brusiva), které jsou spojeny pojivem. Patří mezi nejstarší metody obrábění vůbec. V dnešní době se díky možnostem rozšiřuje z původního, čistě dokončovacího obrábění i do oblasti hrubování a s ohledem na svoji produktivitu je srovnatelná s ostatními metodami obrábění. Velký význam má převážně při výrobě valivých ložisek.

3.2 Charakteristické znaky procesu broušení [4]

- Z důvodu různé geometrie formy zrn a jejich nepravidelnému rozmístění v brousícím nástroji se odebírá nepravidelná tříška,



Obr. 3.20 Nepravidelný úběr třísky [4]

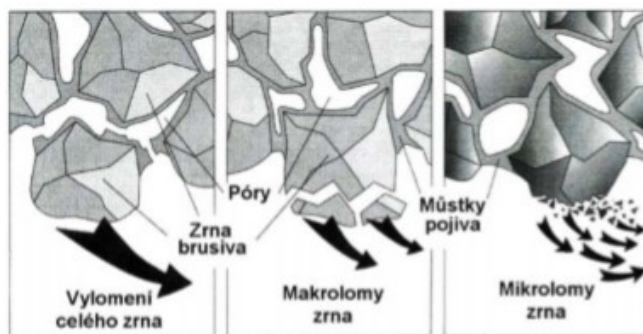


Obr. 3.21 Úhly jednotlivých zrn brusiva [4]

- Záporné úhly čela jednotlivých zrn jsou různé a nejčastěji velké (ovlivňují oblast primární plastické deformace),
- Třísky mají všeobecně malý průměr, přibližně asi 10^{-3} mm^2 , řez je přerušován, a každá tříška má unikátní tvar a rozměr, při broušení dochází ke styku

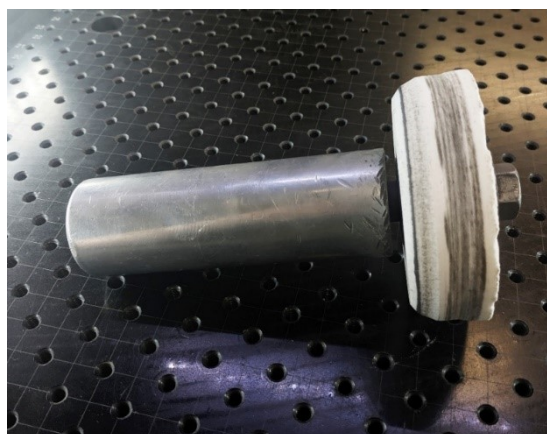
nástroje s obrobkem, což způsobuje tření a plastické deformace, výsledkem toho je vysoká teplota až 1500 °C a důsledkem toho se mohou některé třísky roztavit a shoří,

- Působení velkých řezných sil (odporů) až do výše několika deseti tisíc MPa, vysoká řezná rychlost 30 – 100 m/s, a z toho vyplývá krátká doba záběru jednotlivých zrn,
- Zrna jsou pouze schopna přenášet malé řezné síly, při obrábění dochází k samovolnému uvolňování jednotlivých zrn nebo čistě jejich částí,



Obr. 3.22 Ukázka vylamování zrn [4]

- Při broušení vzniká v bodě dotyku obrovské teplo, proto je třeba chladit jak obrobek, tak brusný kotouč. Toto teplo oduhličuje povrch obrobku, tak dochází ke vzniku trhlin, změně struktury a také má za následek vznik nepříznivých tahových zbytkových napětí na povrchu obrobené plochy,
- Díky otupení ostří jednotlivých zrn brusiva a zanášení pórů třískami, nástroj ztrácí řezivost, ta se obnovuje pomocí orovnávačů (oživení kotouče), existují různé druhy orovnávačů: jednokamenové, vícekamenové, tvarové, ploché.



Obr. 3.23 Orovnávač na oživení diamantových brusných kotoučů

3.3 Druhy broušení v závislosti na tvaru obrobku [4]

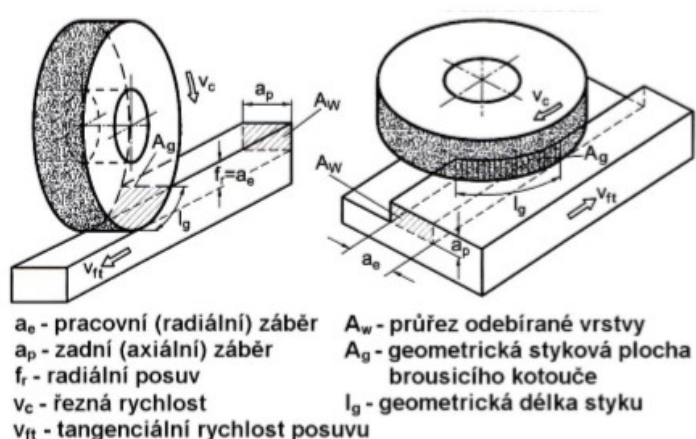
Brousit se dají téměř jakékoliv plochy v různých polohách, z toho důvodu existuje obrovské množství druhů broušení, které je závislé na tvaru polotovaru a jeho obráběné plochy.

Rozdělení dle tvaru obrobené plochy:

- rovinné broušení (rovinné plochy),
- broušení na otáčivých stolech (broušení s rotačním posuvem),
- kopírovací broušení (na NC a CNC strojích),
- broušení tvarovými brousícími kotouči (pro tvarové plochy).
- broušení dokulata (rotační plochy),
- tvarové broušení (ozubené plochy, závit).

Rozdělení dle aktivní části brousícího kotouče:

- Obvodové broušení (broušení obvodem kotouče),
- Čelní broušení (broušení čelem kotouče).



Obr. 3.30 Obvodové broušení (vlevo) a čelní broušení (vpravo) [4]

Rozdělení dle hlavního pohybu posuvu stolu vzhledem k brousícímu kotouči:

- axiální broušení (posuv stolu vede rovnoběžně s osou kotouče),
- radiální broušení (brousící kotouč je radiální vůči hlavnímu posuvu stolu v uvažovaném bodu D),
- tangenciální broušení (vektor obvodové rychlosti v uvažovaném bodu D je rovnoběžný s hlavním posuvem stolu),
- obvodové zapichovací broušení (posuv stolu je plynule radiální),
- čelní zapichovací broušení (posuv stolu je plynulý axiální).

Grafické znázornění závislosti posuvu stol vůči brousícímu kotouči

Rovinné broušení - pohyb stolu		Broušení do kulata	
	přímočarý	otáčivý	
Axiální			
Tangenciální			
Radiální			

n_s - frekvence otáčení brousícího kotouče, n_w - frekvence otáčení obrobku,
 v_{fa} - axiální rychlost posuvu stolu, v_{ft} - tangenciální rychlost posuvu stolu,
 v_{tr} - radiální rychlost posuvu kotouče,
 f_a - axiální posuv stolu, f_r - radiální posuv kotouče

Obr. 3.31 Obvodové broušení [4]

		Radiální	Tangenciální	Axiální
Pohyb stolu	přímočarý			
	otáčivý			

n_s - frekvence otáčení brousícího kotouče, n_w - frekvence otáčení obrobku,
 v_{fa} - axiální rychlost posuvu stolu, v_{ft} - tangenciální rychlost posuvu stolu,
 v_{tr} - radiální rychlost posuvu stolu,
 f_a - axiální posuv stolu, f_r - radiální posuv stolu

Obr. 3.32 Čelní broušení [4]

Dokončovací operace broušení má tyto hlavní přednosti:

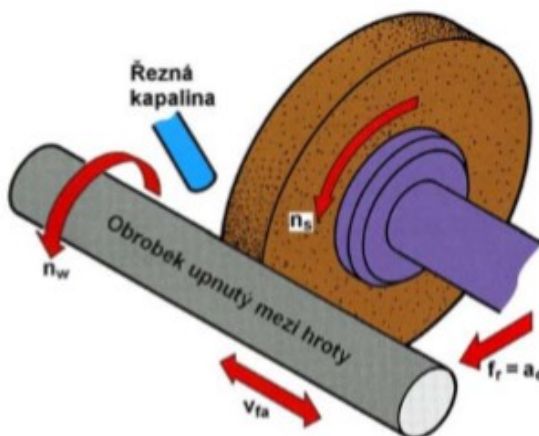
- Jedná se o velmi produktivní metodu, dobrým ukazatelem je velikost plochy, která je obroušená za jednotku času,
- Dají se brousit velké plochy součásti najednou, především u rovinného čelního broušení,
- Velká přesnost dílů ($1 - 3 \mu\text{m}$), malá drsnost R_a obroušené plochy ($R_a = 0,8 - 0,2 \mu\text{m}$),
- Operaci broušením lze obrábět i velmi tvrdé materiály (slinuté karbidy, kalené oceli, tvrzené litiny).

3.4 Axiální obvodové broušení vnějších ploch „dokulata“ [4]

Tato operace broušení je používána zejména při obrábění dlouhých a zároveň rotačních součástí válcového nebo kuželovitého tvaru; pokud je tvar součásti dlouhý a štíhlý, je podepřený lunetou.

3.4.1 Popis procesu obrábění [4]

Obráběná součást se otáčí mezi hroty (n_w) a zároveň se koná posuvný pohyb, který je rovnoběžný s osou obráběné součásti (V_{fa}), nebo obrobek koná čistě otáčivý pohyb a nástroj koná posuvový pohyb podél osy obrobku. Obrobek nebo kotouč se posouvá radiálně (f_r) o hodnotu pracovního záběru ($f_r = a_e$) na každý jednotlivý zdvih či dvoj-zdvih stolu a to zajišťuje úběr třísky broušeného materiálu.



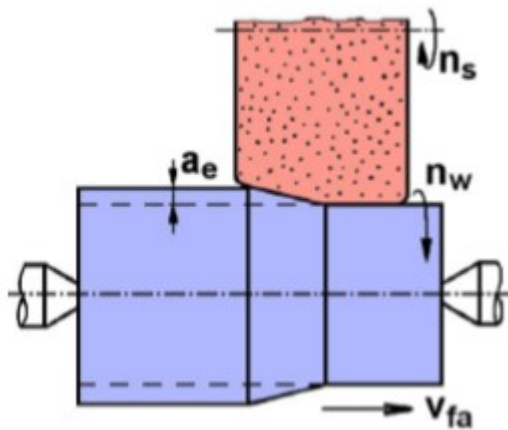
Obr. 3.40 Broušení s podélným posuvem [4]

3.5 Hlubkové obvodové broušení vnějších ploch „dokulata“

[4]

Při této operaci broušení se z materiálu na jeden záběr odebírá vrstva 0.1 - 0,5 mm a posuv se volí velmi malý. Výkon broušení je několikanásobně navýšen oproti jiným metodám broušení a to o 25 % až 75 %, proto patří mezi nejproduktivnější metody broušení. Navzdory tomu je zde velkou nevýhodou této metody zvýšená spotřeba brusných kotoučů

Rychlé opotřebení kotouče nese následky a to, že vzniká přechodová kuželová plocha, která během broušení narůstá, až k druhé straně brusného kotouče. Proto je třeba kotouč srovnat a poté opakovat postup broušení s odstraněnými korekcemi.

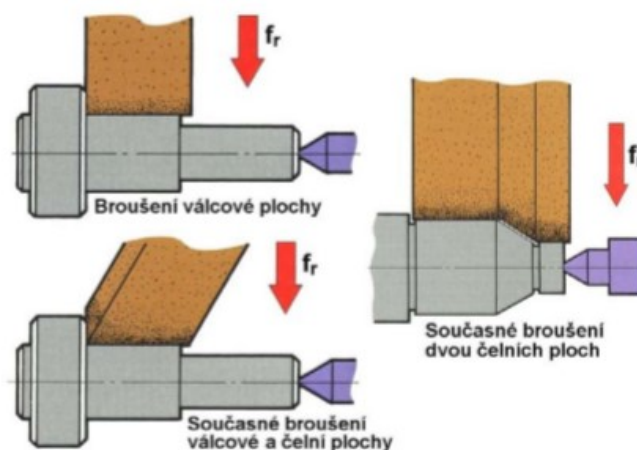


Obr. 3.50 Hlubkové broušení [4]

3.6 Radiální (zapichovací) obvodové broušení vnějších ploch „dokulata“ [4]

U téhle operace broušení je opravdu důležité mít tuhou broušenou součást. Lze i využít šikmý posuv a to tehdy, když nastane případ, že se brousí několik ploch. Obvodová a řezná rychlost je srovnatelná s axiálním broušením, až na to, že výkon broušení je až o 80 % vyšší, než jak tomu je u axiálního broušení.

Při broušení kuželových, nebo válcových ploch se broušená součást upíná mezi hroty, stejně jak je tomu při broušení, ale však hlavní pohyb vykonává brusný kotouč.



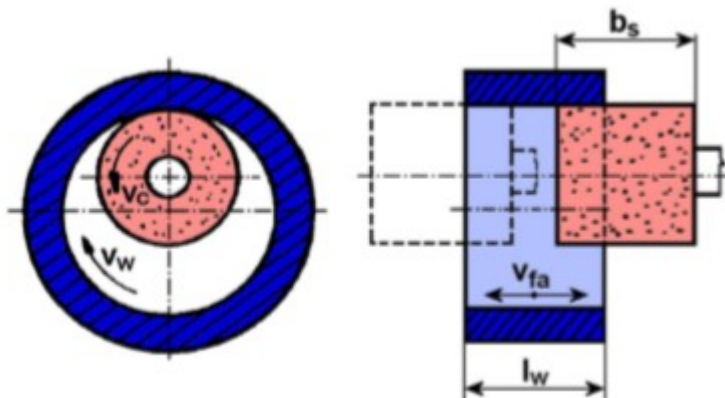
Obr. 3.60 Radiální obvodové broušení vnějších ploch [4]

3.7 Obvodové axiální broušení vnitřních ploch a „dokulata“ [4]

Díky této metodě lze především obrábět součásti, jejichž délka je značně větší, než šířka brusného kotouče. Kotouč se nachází v obráběné díře a otáčí se, přitom vykonává posuv ve směru osy. Obrobek se otáčí kolem své osy, ale smysl otáčení je do protisměru pohybu brusného kotouče.

Pomocí vnitřního broušení se brousí hlavně díry. Má to však své omezení a to, že brousící kotouč by měl mít 0,7 až 0,9- násobek průměru obráběné díry. A to nám ukazuje, že u děr malých průměrů je nutné použít brusné kotouče velmi malých průměrů. Během procesu vzniká velké namáhání brusných zrn, které hraje roli během oddělování třísky, kotouček bývá také velmi rychle opotřebován, zanášá se třískou a kvůli tomu ztrácí jak řezné vlastnosti, tak geometrický tvar.

Kvůli tomu můžeme říci, že vnitřní broušení je relativně nepříznivé a z toho důvodu se používá jen tehdy, není-li možné použít jiný způsob pro výrobu přesné díry, jinak se používá například: honování, vyvrtávání, vystružování.



Obr. 3.70 Axiální broušení vnitřních válcových ploch [4]

U kotoučů s malým průměrem je nutné zajistit velmi vysoké otáčky, které se realizují obtížně. Z toho důvodu se díry malých průměrů brousí s nízkými řeznými rychlostmi a kvůli tomu se zhoršuje povrch a snižuje výrobnost.

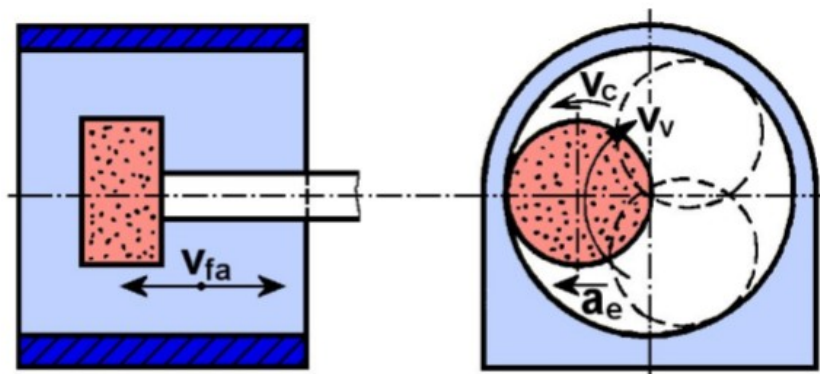
Zvýšením obvodové rychlosti součásti se zlepšuje obvod tepla a také klesá možnost tvoření se opalů na broušeném povrchu. Z toho ale vyplývá kratší doba doteku mezi kotoučem a součástí, a díky tomu to má špatný vliv na drsnost broušené plochy. Také se zhoršují některé technologické podmínky stroje jako třeba zvětšený rozstřik procesní kapaliny.

3.8 Planetové broušení [4]

Touto metodou se brousí otvory velkých a těžkých součástí, které jsou upnuté do sklíčidla a jejich opracování je složité, a proto se volí operace planetového broušení. V případě na uvedeném obrázku (obr. 3.30) tak součást stojí na místě a brusný nástroj vykonává všechny pracovní pohyby:

- otáčí se kolem své vlastní osy,
- posuv ve směru osy otvoru a zároveň obíhá kolem okolo osy obrobku.

Co se týče přesnosti této operace, je značně nižší a to z důvodu malé tuhosti vřetene.



Obr. 3.30 Planetové broušení vnitřních válcových ploch [4]

3.9 Brusné kotouče s diamantovým a KNB brusivem

Tyto kotouče obsahují dva druhy supertvrdých brousících materiálů a to jsou kubický nitrid boru nebo diamant [5]

Diamant – existuje ve formě krystalizujícího uhlíku v kubické modifikaci o specifické hmotnosti $3.52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Normálně se vyskytuje v přírodní formě, nebo se připravuje syntézou za doprovodu vysoké teploty a tlaku. Jedná se o nejtvrdší materiál dle Mohsovy stupnice, kde zaujmul 10 místo. Jedna z dalších vynikajících vlastností diamantu je jeho dobrá tepelná vodivost a také tepelná odolnost do 860°C . Během normálních teplot má odolnost proti všem chemickým vlivům. Je zde ale určité omezení, a to, že z důvodu afinity k železu za vysokých teplot není vhodný ke zpracování oceli. Během broušení dochází totiž na dotykových plochách mezi diamantovými zrny a oceli k značnému vyvinutí tepla a dochází k chemické reakci, která má vliv na změnu struktury jak oceli, tak diamantu. Navzdory tomu se diamant uplatnil v jiném odvětví materiálů, využívá se k broušení tvrdých a zároveň křehkých materiálů jako jsou: [5]

- slinuté karbidy,
- keramika,
- sklo,
- kámen.

Kubický nitrid boru – ve zkratce (KNB) se na rozdíl od diamantu v přírodě nenachází a musí se tedy uměle vyrobit. Jedná se o syntetický materiál, který se vyrábí syntézou z hexagonálního nitridu boru během vysokých teplot a tlaku. Má podobné vlastnosti jako diamant, svojí specifickou hmotnost $3.48 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, ovšem tvrdost dle Mohsovy stupnice zaujímá 9. až 10. místo. Na rozdíl od diamantu má vyšší tepelnou odolnost 1100 až 1200°C a chemickou stálost. Díky těmto vlastnostem se používá především na opracování zušlechťených kalených nástrojových ocelí. [5]

3.10 Charakteristiky brousícího kotouče [5]

I když pořizovací náklady jsou vyšší než u normálních kotoučů, používání diamantových nebo KBN kotoučů přináší nesporné úspory a výhody, například:

- možnost obrábění tvrdých materiálů, které jsou za použití normálních brusných kotoučů těžce, nebo vůbec neobrobitelné,
- vysoká produktivita práce,
- vysoká životnost,
- kotouč si udržuje stejný tvar,

- zlepšení pracovních podmínek,
- produktivita práce je vysoká,
- vysoký výkon broušení,
- hospodaření s odpady (vodou).

Ovšem, aby došlo k naplnění těchto aspektů a kotouč využil se maximální potenciál, je nutné volit vhodné charakteristiky kotouče a používat doporučené podmínky dané výrobcem.

Brousící kotouč lze charakterizovat:

- druh pojiva,
- tvar kotouče,
- rozměry kotouče,
- koncentrace brusiva,
- zrnitost brusiva,
- druh pojiva.

Druh pojiva – Zásadním způsobem ovlivňuje životnost kotouče, tvarovou stálost, výkon broušení, samoostřící vlastnosti. Dle výběru pojiva ovlivníme, zda KBN nebo diamantový kotouč brousí s velkým výkonem při malém přtlaku, navzdory tomu má menší životnost, takové druhy pojiva označujeme jako měkké. A nebo s velkou životností za nízkého výkonu, ale s větším přtlakem je atypické pro tvrdé pojivo.[5]

Pro volbu pojiva, které hlavně záleží na broušeném materiálu a druhu brusiva se ještě musí určit způsob broušení a druh operace.[5]

Tvar a rozměry kotouče – Vybírá se dle operace broušení, a to jestli je potřeba brousit vnější profil, čela, vnitřní profil, nebo dokonce tvarové kotouče. Každý výrobce si tvar kotouče určuje sám, nejčastěji dle normy ISO 6104 a 6168 a tyto rozměry a tvar jsou lehce dohledatelné v katalogu výrobce, ovšem jsou i případy, kdy si tvar kotouče určuje sám zákazník, který to potřebuje na speciální zakázky. Na první pohled na brusném kotouči můžeme pozorovat 2 rozměry a to průměr a šířku. Čím větší průměr má brusný kotouč, tím jsou daleko příznivější kinematické a termické podmínky. To znamená, že brusné zrno díky delší ochlazovací dráze je méně namáháno, než zase bude odebírat třísku a to má příznivý vliv na životnost celého kotouče. Volba průměru přímo závisí na typu brusného stroje, aby dokázal zajistit doporučenou pracovní rychlost dle výrobce a docílil těch neoptimálnějších podmínek. [5]

Tloušťka brousící vrstvy – dle katalogu výrobce lze zvolit tloušťku brousící vrstvy. Doporučuje se základní tloušťka brousící vrstvy čelních kotoučů 1,5 mm u kovových pojiv a pro pryskyřicové pojivo 2 mm. Tlustší brousící vrstvu lze zvolit, ale zvýší se cena brusného kotouče o vyšší obsah brusiva, navzdory tomu se náklady na broušení sníží. [5]

Z vlastní zkušenosti vím, že tloušťka brousící vrstvy by měla být minimálně 3 mm, z důvodu, že keramika je velmi tvrdá a kotouč s menší tloušťkou než 3 mm má tendenci po keramice „skákat“, a tím vytváří šmouhy na povrchu a nejednotný povrch, který se nelíbí zákazníkům, tahle vrstva jako vedlejší funkci, kromě broušení, plní tlumení (odpružení), tím během broušení průměrů válcových součástí vytváří pěkný, jednotný lesklý povrch. [5]

Koncentrace brusiva - vyjadřuje hmotnost obsahu brusiva v 1 cm³ brousící vrstvy. [5]

Nízká koncentrace brusiva zaručuje dobré samoostření kotouče, zvětšuje se výkon při broušení, snižuje se životnost kotouče, zhoršuje stálost tvaru součástí, zvyšuje se drsnost povrchu a snižuje vývin tepla. [5]

Střední koncentrace brusiva se používá při většině brousících operací. [5]

Vysoká koncentrace brusiva zvyšuje životnost kotouče, snižuje se výkon broušení, snižuje se drsnost povrchu, zhoršují se samoostřicí vlastnosti kotouče, zlepšuje se stálost tvaru součástí, zvětšuje se vývin tepla. [5]

4 Návrh nového technologického postupu

Celý experiment se bude provádět na stroji Studer S33 s kontrolním systémem fanuc. Úkolem bude najít nejvýhodnější technologický postup z ohledem na cenu, čas přípravy, hospodárnost, atd.

Od německého partnera mi bylo posláno na experiment 10 kusů keramiky SiC, které mají relativně podobný tvar, jako má kus, pro který děláme technologický postup, ale jsou značně menší a mají rozdílné vnější průměry a výšku, vnitřní průměr má 30 mm u všech kusů.

4.1 Experimentální technologické postupy

Celkově se prováděly tři experimentální technologické postupy:

- broušení v dlouhých čelistech,
- broušení na přípravku,
- broušení na nárazecím trnu (Klopfdorn od firmy Röhmi).

Rozměry nemůžeme porovnávat s původními kusy, jelikož jsou zcela odlišné, avšak můžeme změřit obvodové házení, v našem případě je to 0,02 mm a drsnost povrchu.



Obr. 4.10 Stroj Studer S33 rok výroby 2008

4.2 Volba kotouče a technických parametrů

Volba kotouče je z jednou hlavních aspektů pro dodržení rozměrů a povrchu, ve firmě SD KOVO existuje rozmanitost druhů těchto kotoučů od různých průměrů, až po speciální tvarové kotouče.

4.2.1 Volba kotouče na broušení vnějšího průměru a čel

Kotouč jsem zvolil od firmy Urdiamant s.r.o. typ 2 – 400 – 20/5 D107 K100 B – VII. Číslo 2 znamená tvar kotouče dle katalogu, 400 průměr kotouče, 20 výška kotouče, 5 vrstva brusiva na kotouči (v mm). Poté označení D107 D značí diamant a 107 velikost mikronového prášku [μm], K100 koncentrace brusiva $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, B – VII Pryskyřičné pojivo. Všechny tyto aspekty kotouče by měly zajistit u obrobku dobrý povrch a udržitelnost rozměrů. Omezení tohoto kotouče je rychlost max. 2000 ot/min.

4.2.2 Volba kotoučku na broušení vnitřních průměrů

Kotouček jsem zvolil od firmy Dinas Czech, spol. s.r.o. typ 2 – 25 -6/5 D151 K100 P5. Všechny tyto údaje odpovídají údajům v kapitole 4.2.1, až na P5, pojivo si firma označila jinak a znamená to, že pojivo P5 patří do klasického pryskyřičného pojiva. Omezení tohoto kotouče je rychlost max. 35000 ot/min.

4.2.3 Univerzální brousící parametry

Hrubování	Ot/min	m/min	mm	mm/min
	rychlost kotouče	Rychlost upínací hlavy	úběr třísky	Posuv
Čelo 1	1675	300	x	0,7
Čelo 2	1675	300	x	0,7
vnitřní průměr	25000	270	0,012	600
Vnější průměr	1675	250	0,022	1000
Dokončování	Ot/min	m/min	mm	mm/min
	rychlost kotouče	Rychlost upínací hlavy	úběr třísky	Posuv
Čelo 1	1675	300	X	0,4
Čelo 2	1675	300	X	0,4
vnitřní průměr	25000	270	0,005	300
Vnější průměr	1675	250	0,005	500

Tab. 4.2.3 Univerzální brousící parametry pro brusku STUDER

Program se skládá ze dvou částí, hrubovací a dokončovací sekvence, zbytkové parametry si program sám dopočítává. U broušení čela se udává jenom posuv v mm/min. tyto parametry byly použity u všech tří experimentů.

5 Diskuze experimentu

V experimentu jsem testoval tři technologické postupy a poté z nich vybral, dle mého úsudku ten nejefektivnější, co se týče přípravy a přesností rozměrů, jsou to broušení v dlouhých čelistech, broušení na (v) přípravku, broušení na narážecím trnu (Klopfdorn). Během popisování se může stát, že budu používat terminologii, která je typická pro firmu SD KOVO, tu poté uvedu do závorek.

5.1 Broušení v dlouhých čelistech

Jedná se o velmi známou technologii, která je často používána nejen při broušení ale i při soustružení, v jednoduchosti se kus upne do hlavy s dlouhými čelistmi 3x120° nebo 4x90°. Pokud je obrobek zapřen o své čelo, čelisti by měly mít stykovou plochu obrobku o délce 30 – 50 %, pokud tomu tak není a nelze obrobek zapřít o čelo, tak minimálně 70 – 100 % abychom dosáhli relativně přesných rozměrů. To platí u upnutí jak za vnitřní tak za vnější průměr. Nejdůležitější je ale příprava, aby požadované rozměry a tolerance seděly s výkresem.

5.1.1 Lepení podložek na upínací hlavu

První operace, která se bude provádět je broušení čel. Abychom zajistili rovnoběžnost čel, využijeme při broušení podložky, které přilepíme na upínací hlavu, v našem případě jsem použil Würth super fast glue kyanoakrylátové strukturální lepidlo, které zajišťuje dobrou pevnost mezi hlavou a podložkami. Jako podložky jsem si zvolil keramické podložky, které se dají udělat ze zmetků z předchozích zakázek, konkrétně se jedná o keramiku Al_2O_3 (oxidovaná keramika), dají se samozřejmě použít i kovové, nebo ocelové podložky, ty ale můžou způsobit na broušené keramice metalické otěry, které se nemusí líbit zákazníkovi.

Zvolíme si vhodné čelisti pro náš kus, který poté upneme, ale necháme mezeru mezi upínací hlavou a obrobkem na mezeru větší, než jsou podložky, abychom si mohli zvýraznit, kam je poté nalepíme (podložky umístíme, aby nezavazely při přejezdech broušení vnitřku). Poté je zapotřebí hlavu a podložky pořádně očistit od hrubých nečistot a mastnot (použil jsem technický líh), poté je dokonale osušit. Na podložky nanese vrstvu lepidla a přitlačíme na označené místo na hlavě, držíme přibližně 10 sekund.



Obr. 5.1.11 Nastavení čelistí



Obr. 5.1.12 Lepení podložek

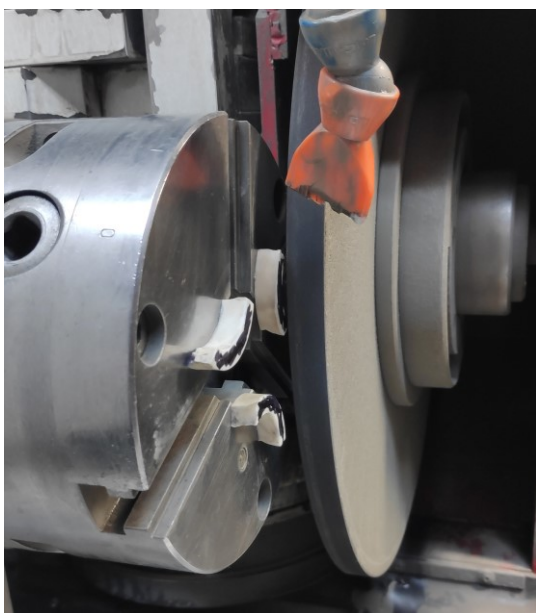
5.1.2 Broušení podložek

Než se pustíme na samotného broušení čel, což je první operace, je zapotřebí zabrousit podložky na stejnou délku, sundáme čelisti a rovinu podložky zabarvíme lihovým fixem, je to pro nás taková vizuální kontrola, že podložky byly zarovnané na stejnou délku.



Obr. 5.1.20 Zabarvení podložek

Broušení se provádí manuálně, ovladačem kotouč (který je uveden na straně 29. v kapitole 4.2) přiblížíme těsně na dotyk k podložkám a zastavíme, několikrát otočíme upínací hlavou, abychom si byli jisti, že kotouč do podložek nenarazí a nevznikla nám škoda. Poté stačí pustit kotouč a vřeteno, na ovladači si nastavíme posuv 0,01 mm a ručně se přibližujeme směrem k podložkám. Zprvu bylo slyšet takové „cinkání“ jak kotouč brousí jednu podložku, poté se začalo ozývat druhé „cinkání“, jak kotouč brousil obě podložky a chvíli nato už bylo jasné, že kotouč brousí všechny 3 podložky, od té doby jsem posunul vřeteno o 0,5 mm, odjel od kotouče a zkontroloval podložky. Po broušení zmizela barva, kterou jsme na začátku zaznačili broušené roviny.



Obr. 5.1.21 Před broušením podložek



Obr. 5.1.22 Po broušení podložek

5.1.3 První operace broušení čel obrobku

Po zdárném broušení podložek, můžeme nasadit zpět čelisti a upnout náš obrobek, musíme si dát pozor, abychom ho upevnili až na doraz, tím docílíme, že obrobek na podložkách několikrát protočíme a ujistíme se, zdali obrobek pevně dosedl a poté utáhneme čelisti (během protáčení, pokud bychom použili kovové nebo ocelové podložky mohou vznikat otěry, v téhle fázi nám to ale nevadí, jelikož se druhá strana bude ještě brousit, ovšem během broušení druhého čela si musíme dávat pozor na tyto otěry).

V kontrolním systému si vytvoříme program na broušení čela, kotoučem přijedeme k obrobku a nastavíme nulový bod, od něj se bude odvíjet rozměr, jelikož brousíme první čelo, tak nemůžeme brousit na požadovanou výšku, musíme si nechat menší rozměrovou rezervu, kvůli broušení druhého čela tak, aby nám to vyšlo na požadovaný rozměr v dané toleranci.



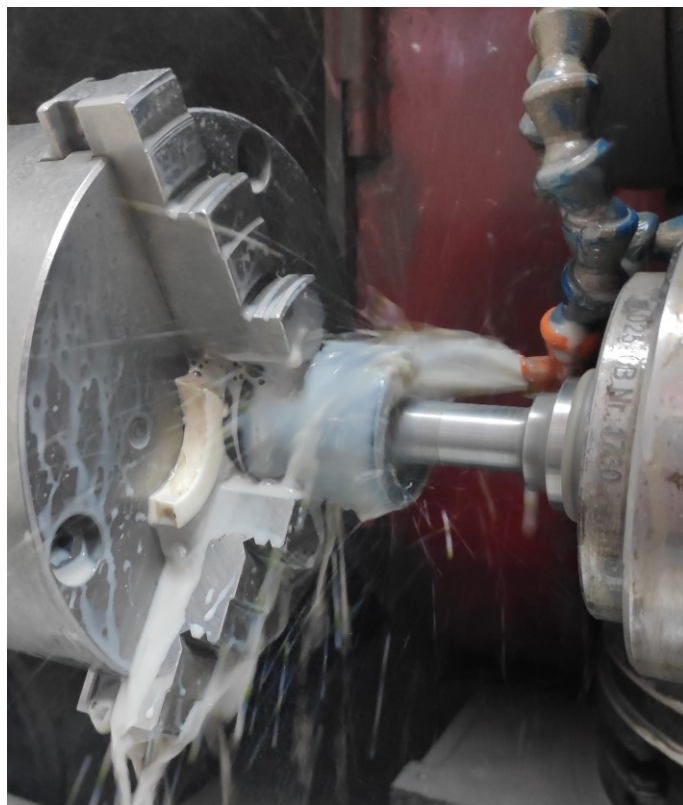
Obr. 5.1.30 Broušení prvního čela

Po broušení si zkontrolujeme výšku obrobku a snažíme se ji udržovat na stejné hodnotě; toho docílíme díky korekcím stroje, nejlépe je kontrolovat každý kus, jelikož teplota v místnosti se mění a to zapříčiní změnu rozměru, také je potřeba orovnat kotouč, když začíná ztrácet své brusné vlastnosti, všechny tyto drobnosti by měl mít brusič na paměti.

Pokud nám výška na všech kusech odpovídá (v našem případě se to nedá určit, jelikož experimentální kusy měly rozdílné velikosti), můžeme začít brousit druhé čelo, postup je obdobný, ale teď musíme vzít v potaz finální výškový rozměr. Takže stejně jak v předchozím případě si najedeme co nejbliž ke kotouči, až se kotouč začne dotýkat obrobku, tak nastavíme nulový bod, pak nastavíme program, aby odpovídal požadovanému rozměru. Po dojetí kusu zkontrolujeme házivost čel, můžeme udělat přímo ve stroji úchylkoměrem 0,01 mm nebo na prisma stejným způsobem a na výškoměru zkontrolujeme celkovou výšku (i na výškoměru se zdá zjistit házivost, když změříme výšku na několika bodech, vezmeme největší bod a od něj odečteme nejnižší bod, tak získáme maximální hodnotu házivosti). Při experimentu byla házivost čela 0,009 mm.

5.1.4 Druhá operace broušení vnitřního průměru

Jelikož už máme vytvořené podložky a čelisti nám vyhovují délkou, můžeme začít brousit vnitřní průměr, proto musíme otočit brusným kolem, abychom dostali nástavec pro brusné kotouče, které brousí díru, zvolíme si vhodný trn, aby nenarazil do obrobku a malý kotouč (fortuna), (malý kotouč je uveden na straně 29 v kapitole 4.2) měl dostatečné místo na přejezdy. U této operace si musíme zvolit dva nulové body (výšku a průměr), výška jde určit snadno, brusným kotoučem si dojedeme k obrobku a v bodě, kde se ho dotkne, nastavíme nulu, ovšem u průměru můžeme použít dva způsoby. Buď si změříme průměr díry a v bodě dotyku si odjedeme od kusu 0,5 – 1 mm a nastavíme nulový bod (odjez se dělá z důvodu, že by některý kus měl jiný rozměr, než náš orientační a toto by mělo předejít nabourání stroje) nebo do čelistí upneme etalon, který má přesný rozměr a má podobný průměr jako díra a v bodě dotyku si zvolíme nulový bod. Poté stačí napsat program, který zajistí požadovaný rozměr díry. V průběhu práce je ovšem nutno zadávat korekce, aby všechny kusy měly podobný průměr a hlavně byly v tolerančním poli.



Obr. 5.1.40 Broušení díry v dlouhých čelistech

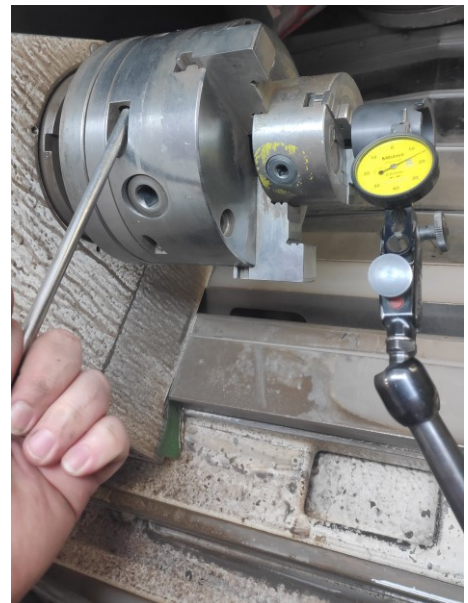
5.1.5 Třetí operace broušení vnějšího průměru

Poté bylo zapotřebí kus vyrovnat, aby házivost průměru nepřesáhla 0,02 mm, to se následně provede korekcí hlavní upínací hlavy a kontrole na úchylkoměru 0,01 mm.

Po uvolnění imbusových šroubů na čele hlavy a nastavení úchylkoměru na vnější povrch (povrch by byl normálních kusů surový, ovšem experimentální kusy byly dříve už broušeny a jedná se o zmetky, tak by se úchylkoměr nastavil na vnitřní průměr obrobku), poté na obvodu hlavy korigujeme šrouby a otáčením hlavy házivost kusu do té doby, až budeme v toleranci do 0,02 mm, v mém případě se mi to povedlo do tolerance 0,015 mm. Poté imbusové šrouby opět utáhneme



Obr. 5.1.50 Uvolnění imbusových šroubů



Obr. 5.1.51 Korekce házivosti

Ted' už zbývá napsat jenom program, určit nulový bod, kotoučem přijedeme k průměru, který jsme změřili a nastavíme nulový bod, brousíme stejným kotoučem jako v první operaci. Po dojetí programu zkontrolujeme kus ve stroji na házivost a zda-li průměr odpovídá rozměrům v tolerančním poli.



Obr. 5.1.52 Broušení vnějšího průměru v dlouhých čelistech

5.1.6 Doplnkové operace

Může se jednat o zkosení na hranách nebo radiusy, keramika by neměla mít ostré hrany, protože hrozí lehké vyštípnutí a to vede k znehodnocení celého kusu, tedy pokud si je zákazník nepřeje, ale to se stává v málo případech, každopádně pokud dle zakázky zkosení vychází do tolerovaného průměru i když je surové, nemusí se brousit, v opačném případě se brusný kotouč nastaví na požadovaný úhel a brousí se hrana dle výkresu, nebo může nastat případ, že místo zkosení je potřeba udělat zaoblení, to se dělá ručně diamantovou houbičkou a kontroluje se podle etalonu.

5.1.7 Kontrola kusu

Kontrola házivosti se provede na 3D měřidle Mitutoyo Crysta plus M544, a na prisma společně s 0,01 mm úchylkoměrem. Drsnost na povrchu všech experimentálních kusů byla do Rz 2.

5.2 Broušení na přípravku

K této technologii je zapotřebí vyrobit přípravek, který svými rozměry odpovídá danému kusu. V našem případě se jedná o válcový tvar o průměru díry 30 mm, za kterou budeme kus upínat do přípravku. Nejdříve než ale budeme moct přípravek vyrobit, musíme udělat menší úpravy na obrobku.

5.2.1 Lepení a první operace broušení čel na podložkách

V jednoduchosti se jedná o stejný postup, který jsem uváděl v kapitole 5.1, konkrétně 5.1.1 až 5.1.3 strana 30 až 32. Během této operace je zapotřebí čela nabrousit do relativně přesné rovinnosti vůči sobě, toho docílíme nalepením keramických nebo kovových podložek na upínací hlavu (podložky a hlavu je třeba dokonale očistit, abychom mohli dosáhnout největší možné pevnosti), po kontrole, že podložky pevně sedí na hlavě můžeme začít zabrušovat jejich roviny, provizorně si tyto roviny zabarvíme lihovým fixem, abychom mohli si být jistí jejich broušením na stejnou výšku, samozřejmě je dobré si je zkontrolovat posuvkou, zda-li výšky odpovídají.

Po nabroušení podložek můžeme brousit první čelo obrobku, ten si upneme do čelistí a zadní čelo se musí dotýkat podložek, na obrobek působíme tlak směrem do hlavy a otáčíme s ním kolem své osy, až si budeme jisti, že obrobek pevně sedí na podložkách, můžeme utáhnout čelisti a spustit program. Kusy se snažíme nabrousit na stejnou výšku, toho docílíme díky korekcím na stroji, kdy si budeme na výškoměru proměřovat každý kus a přidávat směrem do osy z korekce.

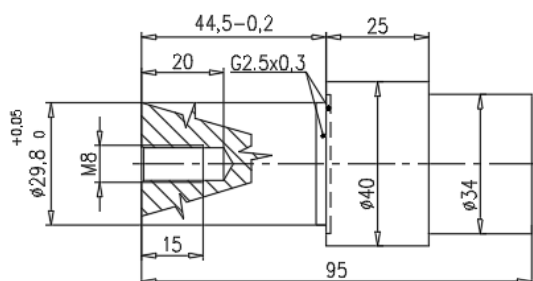
Poté co máme nabroušeno první čelo, můžeme se pustit do broušení druhého čela, nesmíme však zapomínat že tato operace nám způsobí finální výšku kusu (pokud ovšem obrobek nejde dále na operaci lapování, to se nechává přídavek přibližně 0,1 mm). Kus opět zapřeme o podložky, teď už jenom s minimálním pootáčením, aby nedošlo k porušení struktury čela (různé škrábance) a upneme do čelistí. Po broušení je třeba zkontrolovat, jestli je kus na požadovaném rozměru dle výkresu. Touto operací jsme si připravili obrobek na druhou operaci a to broušení na (v) přípravku vnějšího průměru.



Obr. 5.2.10 Broušení čela obrobku

5.2.2 Výroba přípravku

Než budeme moci brousit vnější průměr, je potřeba si vyrobit přípravek, na kterém to budeme brousit. Rozměry přípravku jsou odvozeny dle rozměru obrobku, v našem případě vnitřní průměr, za který budeme obrobek upínat má 29,94 mm, celková výška po broušení čel 45 -0,4 mm a vnější průměr, který se bude brousit 42 +0,05 mm (tyto rozměry nejsou nikterak důležité, sám sem si je určil dle kusu, který je čistě experimentální). S ohledem na tyto rozměry musíme vytvořit jedinečný přípravek, který bude sloužit čistě jen na tento kus (v případě nutnosti lze udělat z přípravku jiný přípravek pro menší kusy). Materiál přípravku je ocel třídy ČSN 12 050, jedná se o tyč o průměru 40 mm a délce 100 +1 mm. V prvním kroku je potřeba udělat výkres, dle kterého se bude přípravek dělat.



Obr. 5.2.20 Náčrt přípravku

Na přípravku je nejdůležitější průměr $29,8 +0,05$, který je menší než průměr z toho důvodu, aby bylo možné obrobek vyklepat do házivosti $0,02 \text{ mm}$ a výška $44,5-0,2 \text{ mm}$, která nesmí být větší než minimální výška obrobku, jelikož na obrobek bude tlačit podložka upevněná na šroubu M8. Další důležitý prvek je G zápich, který se nachází na průměru, ale také na čele přípravku, jelikož keramika je křehká a obrobek má ostré hrany s minimálním zkosením je třeba, vyrobit tento zápich, aby vznikla mezera mezi přípravkem a hranou obrobku. Zbytkové rozměry, jako třeba 40 mm , což je průměr polotovaru, můžeme nechat a nemusíme ho soustružit, jelikož víme, že průměr obrobku má být 42 mm , tak na broušení je vytyčena mezera minimálně 1 mm . Čelo poté nabrousit.



Obr. 5.2.21 Hotový přípravek



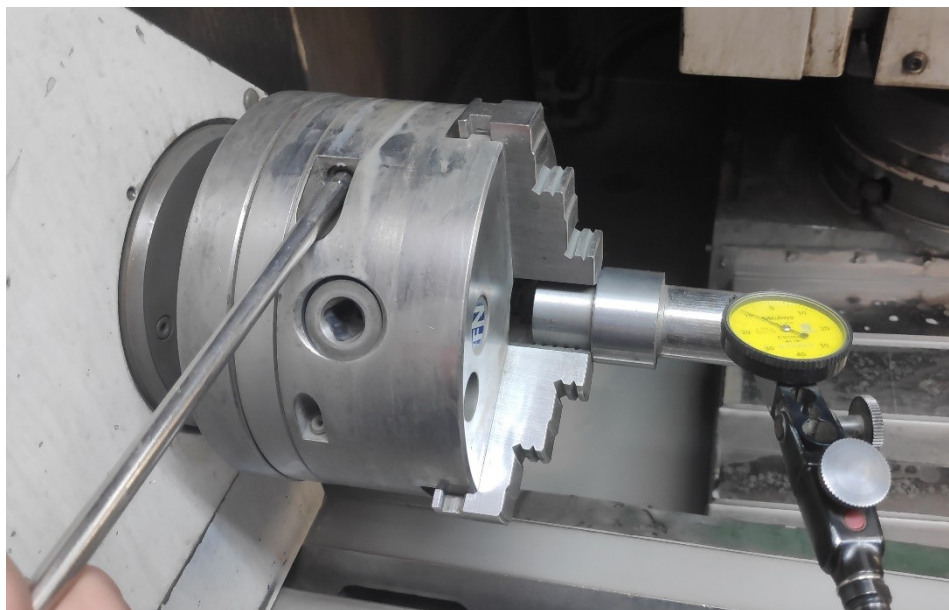
Obr. 5.2.22 Kus upevněný na přípravku

Na obrázku 5.2.22 je vidět, že kus je upevněn přes pokličku a šroub M8, ovšem jedná se pouze teď o zkoušku, zda-li kus sedí na přípravku, a jak můžeme vidět, tak sedí perfektně, ovšem mezi přípravkem a obrobkem musí být vůle, která byla požadována, aby mohlo dojít vyklepávání do tolerance házivosti $0,02 \text{ mm}$

Nejdřív, než se však pustíme do samostatného vyklepávání kusu na přípravku, je třeba přípravek upevnit do čelistí a taky jej vyrovnat, abychom došli k požadované výsledné házivosti na kuse.

5.2.3 Upevnění a vyrovnávání přípravku

Přípravek upevníme za upínací část do čelistí a zkontrolujeme házivost, ovšem nám nevychází a je třeba jí upravit na upínací hlavě. Až se nám povede vyrovnat obrobek do tolerance $0,02 \text{ mm}$, můžeme přejít k dalšímu kroku a to upnutí a vyrovnání kusu.



Obr. 5.2.30 Kontrola a následná úprava házivosti přípravku na upínací hlavě

5.2.4 Upnutí a vyrovnání kusu

Kus nasadíme na přípravek a upevníme ho pokličkou a šroubem M8, jelikož mezi přípravkem a kusem je vůle je třeba jej vyklepat do tolerance 0,02 mm házivosti, proto kus nesmíme utáhnout šroubem na doraz, ale tak aby se dalo s ním lehce manipulovat, ale však utáhnutí nesmí být tak malé, že nám během manipulace sám padá a opírá se o vnitřní průměr, proto je potřeba najít tak zvaný zlatý střed, pokus jsme jej našli můžeme přiložit úchylkoměr na vnější průměr kusu a zkontrolovat házivost, samozřejmě nám nevychází a tak je třeba ji manuálně určit vyklepáváním korkovým nebo plastovým válečkem, v jednoduchosti budeme otáčet kusem, tam, kde uvidíme, že na úchylkoměru je největší hodnota, tak tam lehce poklepeme plastovým válečkem a budeme to opakovat tak dlouho, dokud házivost kusu nebude pod 0,02 mm, poté šroub už jednoduše utáhneme a můžeme brousit vnější průměr.



Obr. 5.2.40 Vyrovnávání kusu do tolerance 0,02 mm



Obr. 5.1.41 Upnutý kus připraven k broušení

5.2.5 Druhá operace broušení vnějšího průměru

Kotoučem si přijedeme manuálně co nejbližší k obrobku a pak přepneme na posuv 0,001 mm a dotkneme se kotouče, tak si zvolíme nulový bod, potom vytvoříme program, musíme si dát pozor, abychom přejezdy nezvolili moc velké, že by mohly nabourat do čelistí.



Obr. 5.2.50 Broušení vnějšího průměru na přípravku

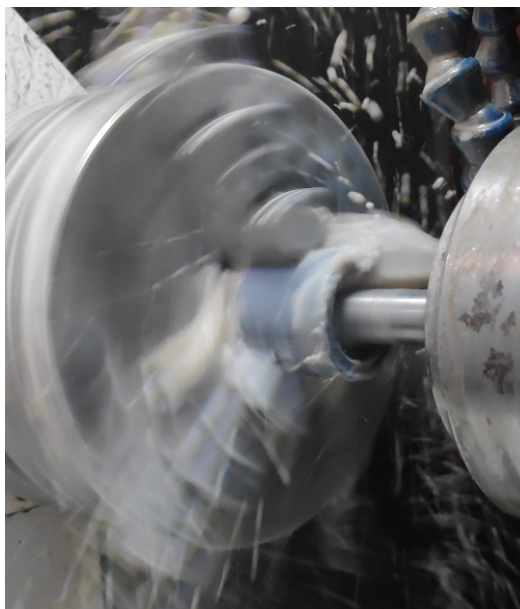
Kus si poté ve stroji zkontrolujeme na průměr a na házivost, v mém případě byly tyto dva parametry splněny dle rozměrů, které jsem si určil.

5.2.6 Třetí operace broušení vnitřního průměru

V této poslední operaci se na rozdíl od předchozího technického postupu broušení v dlouhých čelistech průměr díry brousí podle vnějšího průměru, proto je nutné vzít opačné čelisti, aby se čela měla o co zapřít, nebo nechat podložky z první operace pokud nezavazely, popřípadě je můžeme zpět nalepit a v poslední řadě máme možnost kus brousit do dlouhých čelistí bez opory čela, tady je ovšem riziko, že ne pokaždé se nám podaří upnout kus ve stejné pozici a tak může dojít k nedobroušení průměru, nebo nabourání stroje do obrobku.

V mém případě mi jedna z podložek zasahovala do upnutí přípravku, z toho důvodu jsem byl nucen je sundat, a jelikož opačné čelisti nebyly v ten moment k dispozici, opět jsem přilepil podložky a zabrousil je na stejnou výšku.

Po nabroušení podložek, kus upneme do čelistí a vyrovnáme ho pomocí hlavy a úchylkoměru 0,01 mm do házivosti 0,02 mm, také si zkontrolujeme házivost na čele, jestli podložky byly nabroušené dobře, kus měl házivost na čele 0,08 mm. Nastavíme malý brusný kotouč (fortunu), musíme si také zvolit dostatečně dlouhý trn. Kotoučem si přijedeme manuálně do díry a snažíme se ho dostat k bodu doteku na vnitřním průměru a zvolíme nulový bod, poté si nulový bod zvolíme na čele kusu. Napíšeme program a zvolíme vhodné přejezdy, aby kotouč nenarazil do upínací hlavy, nebo stroj do kusu.



Obr. 5.2.60 Broušení vnitřního průměru

5.2.7 Kontrola kusu

Jelikož každý z experimentálních kusů má jiné průměry a výšky, rozhodl jsem se při tomto technologickém postupu použít jenom jeden kus, ale určil jsem si předem rozměry, na které to budu brousit, a výsledné rozměry jsou uvedené v tabulce. Drsnost na povrchu všech experimentálních kusů byla do Rz 2.

	Požadované rozměry	Nabroušené rozměry
Vnější průměr [ø d]	42 +0,05 mm	42,028 mm
Vnitřní průměr [ø D]	30 +0,05 mm	30,012 mm
Celková výška [h]	45 -0,04 mm	44,983 mm
Celková házivost	max 0,02 mm	0,011 mm

Tab. 5.2.7 Kontrolování kusu

5.3 Broušení na nárazecím trnu

Ve firmě SD KOVO existuje sada nárazecích trnů - kuželů (Klopfdorn od firmy Röhme) s příslušnými kleštinami v rozmezí 25 – 55 mm. Princip je velmi jednoduchý a účinný, na nárazecí trn (který má normalizovaný kužel). Kus nasadíme na kleštinu, kterou poté nasadíme na trn a zvolíme si umístění kusu na kleštině. Silným rázem z nejširší části trnu o nějakou pevnou podložku, v našem případě můžeme použít rovinu svěráku, kterým máme připevněný ke stolu. Ráz způsobí, že se kleština roztáhne a jelikož je na ní nasazený kus, který brání jejímu maximálnímu rozevření, tak se kus na pevně ustálí. Tato metoda má své omezení, které si rozebereme později. Než ale budeme moci začít brousit, musíme na stroji udělat menší modifikace, abychom mohli brousit mezi hroty.



Obr. 5.3.10 Sada nárazecích trnů včetně kleštin

5.3.1 První operace broušení díry

V první operaci se musí nabrousit díra, podle které se budou odvíjet zbytkové rozměry. Důležitá je také drsnost po broušení; kdybychom na narážecí trn upnuli kus se surovým povrchem, nedošlo by tak k dobrému kontaktu mezi kusem a kleštinou, jelikož by byl upnutý jenom na těch nejvyšších bodech drsnosti povrchu a hrozilo by, že kus má tendenci se uvolnit. Tato skutečnost vyplývá ze zkušenosti brusičů ve firmě. Jednou zkoušeli upnout kus za surovou díru, následek byl takový, že kus se uvolnil, rozbil se a zničil kleštinu i brusný kotouč. Z toho důvodu se nejdříve brousí díra.

Postup je obdobný jako v technologii 5.1 a 5.2, kdy se nalepí podložky, zabrousí se na stejnou výšku, ale však máme dvě možnosti jak brousit, a to záleží přímo na tvaru kusu, pokud má na koncích vnitřního průměru velké zkosení (náběhy), stačí brousit jenom díru, pokud ale zkosení jsou malá a hrozilo by, že kotouč by mohl najet do kleštiny, brousí se čelo a pak díra, nebo stačí nabrousit jenom díru, důležité je aby všechny operace „běžely“ podle předchozí, to znamená, že se nabrousí díra, podle díry se nabrousí vnější průměr a čelo, a podle čela se nabrousí poslední čelo. V našem případě jsou zkosení velmi malá, proto musíme přistoupit k druhému způsobu. Zvolil jsem druhý způsob, kde se nejdříve bude brousit díra na podložkách, tato operace je popsána v kapitole 5.1, konkrétně 5.1.1 až 5.1.4., v jednoduchosti se podložky musí nabrousit na stejnou výšku, zkontrolujeme házivost podložek, poté se brousí vnitřní průměr na požadovaný rozměr.

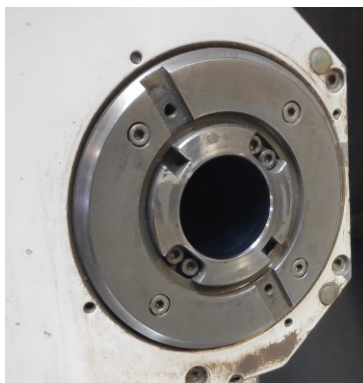
Je nutné si dát pozor na uložení podložek, v kapitole 5.2 nám podložky zabránily brousit na přípravku, a proto byly sundány a poté v další operaci byly opět potřeba, proto je nutné zvolit vhodné podložky a vhodně je umístit, aby se nám operace zbytečně neprodužovala.

5.3.2 Modifikace stroje

Než budeme moct začít brousit na trnu, musíme udělat menší úpravy, jelikož nejde brousit v upínací hlavě a je třeba ji sundat, toho docílíme tak, že se ze zadní části vřetene vysune hřídel a poté speciálním klíčem se uvolní hlava, tyto části stroje se očistí od vlhkosti a špíny, aby nedošlo k jejich znehodnocení. Nejlépe tak uděláme, že bavlněnou látkou je očistíme, poté použijeme technický líh a v poslední řadě, můžeme nanést ochrannou vrstvu oleje. Následně na to musíme pořádně vyčistit kuželovou díru, ve které byla usazená upínací hlava, nejlépe to uděláme technickým lihem na papírové utěrce. Poté můžeme nasadit hrot a unášec.



Obr. 5.3.20 Upínací hlava

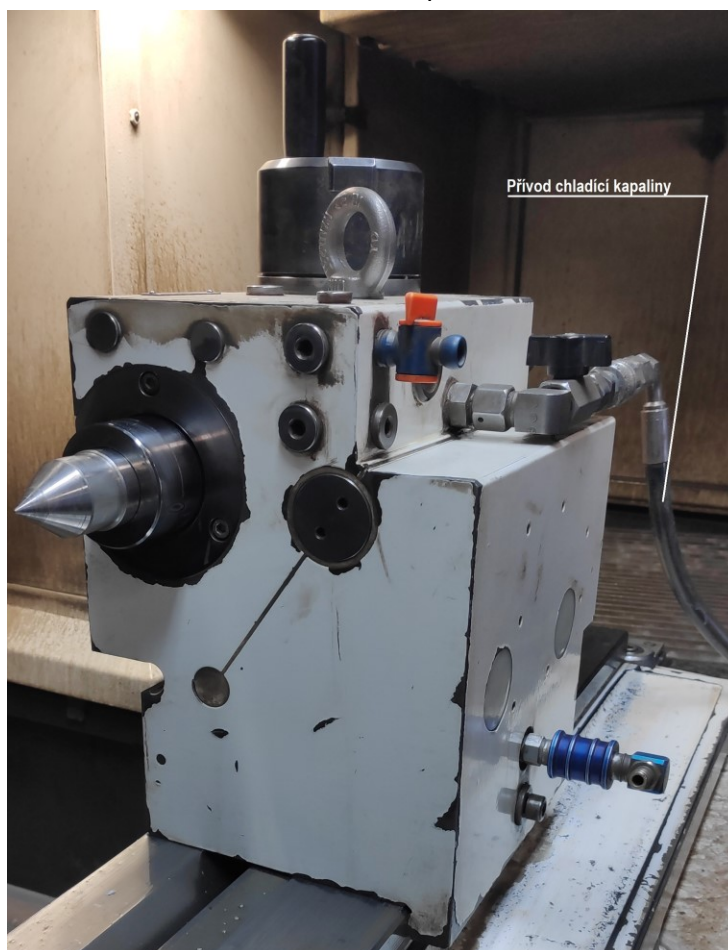


Obr. 5.3.21 Sundání hlavy



Obr. 5.3.22 Hrot s unašečem

Poté je potřeba usadit koníka na pojezdový stůl stroje, koník samotný váží přibližně 100 kg, proto je potřeba ho do stroje dostat minimálně ve 2 lidech, našťestí na koníkovi je úchyt, kterým jde prostrčit tyč a jde s ním tak lépe manipulovat, po usazení koníka do stroje se musí napojit chladicí kapalina. Celá modifikace stroje trvala přibližně 30 minut, ještě je potřeba zkontrolovat souosost hrotů a házivost na trnu, korekci můžeme provést na zadní části koníka, korekčním kolečkem, nebo posunutím celého stolu.



Obr. 5.3.23 Usazení koníka na stůl a zapojení chladicí kapaliny

5.3.3 Druhá operace broušení vnějšího průměru a čela

Jelikož průměr díry je přibližně 30 mm, zvolil jsem kleštinu také 30 mm, kus bude upevněný za okraj s mírným přesahem čela, aby se mohl brousit vnější průměr a čelo na jedno upnutí. Kus si nasadíme na kleštinu a poté kleštinu s kusem na samotný trn, zkontrolujeme, zda-li máme mírný přesah a silným rázem o rovinu svěráku upevníme kus (ráz nesmí být moc silný, můžeme ho několikrát zopakovat, abychom si byli jisti upevněním kusu). Poté vezmeme trn s kusem na výškoměr a změříme si výšku na horním čele (kusem otáčíme kolem své osy, abychom zjistili nejvyšší bod kusu) a vynulujeme výškoměr, podle této výšky si určíme ve stroji nulový bod, podle kterého se nám budou odvíjet zbytkové body, jelikož kus nemůžeme upnout vždy stejně.

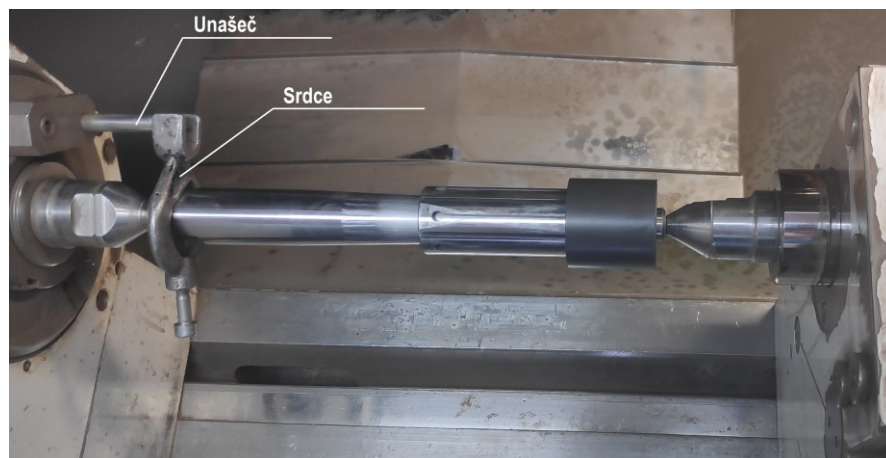


Obr. 5.3.30 Upnutí kusu



Obr. 5.3.31 Nastavení nulového bodu

Poté můžeme kus vložit do stroje, nejdříve ale na rovinnou část trnu musíme upnout srdce, které nám díky unašeči bude otáčet s celým trnem a tím pádem i kusem. Poté si brusným kolem přijedeme k čelu obrobku a nastavíme nulový bod, následně si změříme vnější průměr, přijedeme si ke kusu v bodě měření a poté si 0.5 mm odjedeme od kusu a nastavíme nulový bod (kdyby náhodou nějaký kus měl větší průměr než náš původní, tak se dává menší odjezd, aby kotouč do kusu nenaboural).



Obr. 5.3.32 Upnutí trnu s kusem mezi hroty do stroje

Po broušení musíme kus dostat z kleštiny, použijeme tyčku odpovídající koncovému průměru trnu a měděnou baličku, trn si s kusem položíme na stůl, přiložíme tyčku k trnu a jemným vyklepáním uvolníme kus, je nutné si dávat pozor, abychom netrefili kus.

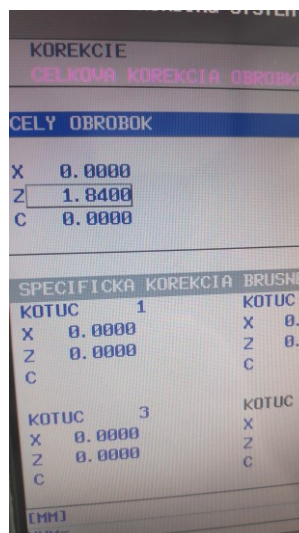


Obr. 5.3.33 Uvolnění kusu z trnu

Po kontrole kusu se trn musí očistit a vyfoukat, aby nedošlo k znehodnocení příštího broušeného kusu, poté co jsme si jisti, že trn s kleštinou je čistý, stejným způsobem nasadíme další kus a změříme ho na výškoměru, ovšem bude mít rozdílnou výšku, tak opět vezmeme nejvyšší bod, který jsme naměřili a vložíme ho do korekce stroje, konkrétně do osy Z stroje.



Obr. 5.3.34 Měření rozdílu výšek



Obr. 5.3.35 Zadávání korekce do osy Z stroje

5.3.4 Třetí operace broušení posledního čela

Vrátíme zpět upínací hlavu s podložkami a zarovnáme je na stejnou výšku, poté vrátíme stejné čelisti a brousíme čelo na požadovanou výšku.

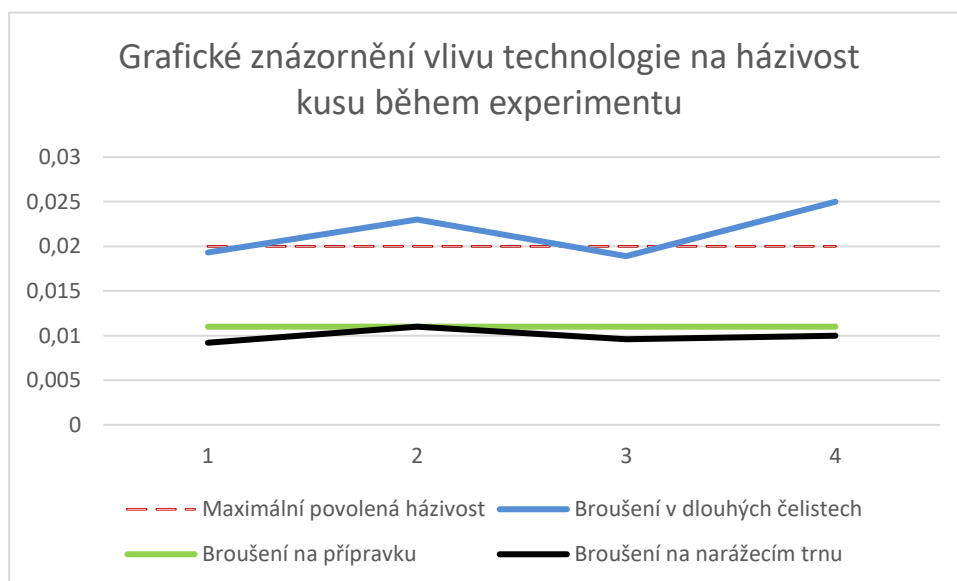
5.4 Vyhodnocení experimentu

Během experimentu jsem se snažil najít efektivní technologický postup broušení, co se týče přípravy a množství operací pro můj zadaný kus. V této kapitole shrnu mé poznatky a zvolím technologický způsob, který budu aplikovat na již řečený zadaný kus.

Broušení v dlouhých čelistech – jedná se o běžnou brousící metodu, ke které není třeba vytvářet speciální přípravky, nebo něco podobného. Navzdory tomu, je zde ale potřeba několik příprav, než se začne brousit, a to od nalepení a zarovnání podložek, až po vyrovnávání kusu. Během experimentu jsem použil čtyři kusy, z toho dva byly na hraně tolerance 0,02 (konkrétně 0,0193 a 0,0189 mm) a zbylé dva kusy byly mimo tuto toleranci (konkrétně 0,025 a 0,023 mm), z toho důvodu jsem upustil od této technologie, hlavním nedostatkem je lidský faktor při vyklepávání kusu a měnící se teplota v místnosti.

Broušení na přípravku – v této technologii je zapotřebí vyrobit relativně přesný přípravek, který svými rozměry odpovídá jenom jedné zakázce, z důvodu četnosti zakázek a času stráveného přípravami a na tvorbě přípravku, je tento technologický postup relativně neefektivní. Navzdory tomu, měl skvělé výsledky, co se týče házivosti vnějšího průměru 0,011 mm, ovšem tento experiment jsem mohl provést jenom na jednom kuse z důvodu, že přípravek není univerzální.

Broušení na narážecím trnu – díky sadě narážecích trnů ve firmě a jejímu univerzálnímu použití, byla toto jasná volba, co se týče dostupnosti a efektivnosti technologického postupu, menším ztížením je modifikace stroje a vyrovnávání trnu, ovšem pokud se provede všechno správně, tak se již házivost nemusí upravovat korekcí a drží se poměrně na stejných hodnotách (konkrétně 0,0092; 0,011; 0,01; 0,0096) proto budu aplikovat tento postup na zadaný kus.



Obr. 5.40 Graf znázorňující vliv technologie na házivost kusu během experimentu

5.5 Aplikace technologického postupu

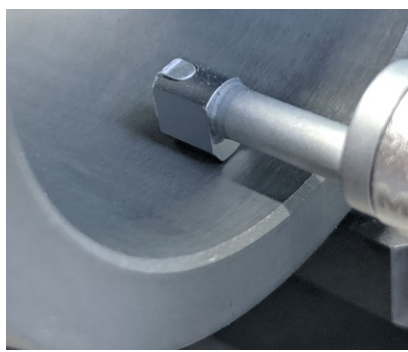
Zadání je kus hřídelové pouzdro z keramiky SiC, které je vidět v příloze A, nemohl jsem použít originální výkres, jelikož se jedná o majetek zákazníka, tak jsem udělal nový výkres v softwaru TurboCad, se všemi náležitými rozměry, tolerancemi a drsnostmi.

5.5.1 První operace broušení

První operace nebude probíhat na stroji Studer, ale na stroji Tschudin 9, jedná se o dvou-osý brusný stroj, který je speciálně upraven na broušení vnitřních průměrů. Začneme brousit průměr 40 mm o toleranci E9, házivost kusu má být maximálně 0,02 mm. Zvolíme vhodné čelisti, jejichž zaoblení odpovídá vnějšímu průměru kusu, v tomto případě nemusíme lepit podložky na upínací hlavu, jelikož díra v hlavě nám dovolí upevnit kus za čelo upínací hlavy a také nám dovolí udělat přejezdy. Teď už zbývá si zvolit kotouček a dostatečně dlouhý trn. Kusy se snažíme brousit na střed tolerance.



Obr. 5.5.10 Broušení díry



Obr. 5.5.11 Měření drsnosti díry



Obr. 5.5.12 Drsnost Rz

Po broušení je třeba zkontrolovat díru každého kusu dutinovým mikrometrem a také drsnost povrchu na drsnoměru (stačí 6 kusů ze zakázky, drsnost zůstává přibližně stejná), dle výkresu kontrolujeme drsnost Rz, což je výška nerovnosti profilu určená 10 body (průměrná hodnota z absolutních pěti hodnot maximálních a pěti hodnot minimálních profilu křivky). Díra musí mít relativně dobrou drsnost povrchu, abychom docílili pevného upnutí na kleštině při druhé operaci.

5.5.2 Druhá operace broušení čel a vnějšího průměru

Než budeme moci začít brousit, musíme udělat modifikaci stroje Studer na broušení mezi hroty, celkový postup se nachází v kapitole 5.3.2, v jednoduchosti je zapotřebí sundat upínací hlavu a pořádně ji očistit, poté na místo hlavy vložíme hrot a unašeč, v poslední řadě je třeba usadit koníka na stůl, to se musí udělat ve dvou lidech, až koník sedí na svém místě, je potřeba ho nastavit na vzdálenost trnu, který bude upnutý mezi hroty a zapojit do oběhu chladicí kapaliny.

Po úspěšné modifikaci, můžeme kus upnout na narážecí trn, v tomto případě se budeme řídit dle tvaru kusu, ten nám totiž umožňuje brousit jak vnější průměr, tak i obě dvě čela na jedno upnutí díky zkosení $2 \times 45^\circ$, které se nachází na vnitřním průměru čela. Ovšem, abychom tak mohli brousit, je třeba, aby tahle část kusu směřovala vždy dozadu, jelikož když se bude brousit toto čelo, kotouč má dostatečný prostor a není tak velké riziko, že by se dotknul kleštiny a zničil ji. Tímto se liší technologický postup od toho experimentálního v kapitole 5.3, kde jsme si mohli dovolit brousit jenom jedno čelo.

Zvolíme si kleštinu o průměru 40 mm, mezi kusem a kleštinou vznikne menší vůle, tak je potřeba nejdřív nasadit kleštinu na trn a poté až samotný kus, ujistíme se, že kus má menší přesah a během broušení předního čela nám kotouč nebude zasahovat do kleštiny a silnými rázy o rovinu svěráku kus na pevno upneme. Poté si výškoměrem změříme nejvyšší bod čela, po nalezení nastavíme nulu, jako orientační bod při zadávání korekce do stroje.

Poté vložíme upnutý kus do stroje mezi hroty a napíšeme program, nulový bod si nastavíme tam, kde jsme si ho nastavili na výškoměru. Přední čelo má zkosení 15° a jsme omezení průměrem 52 mm, tento údaj je potřeba brát při psaní programu v potaz, abychom nevytvářeli zmetky, délka tohoto zkosení je přibližně 5.6 mm v ose Z stroje. Brousíme na celkovou výšku kusu $70 \pm 0,05$ mm, snažíme se brousit na střed tolerance.



Obr. 5.5.20 Upnutí kusu mezi hroty na narážecím trnu

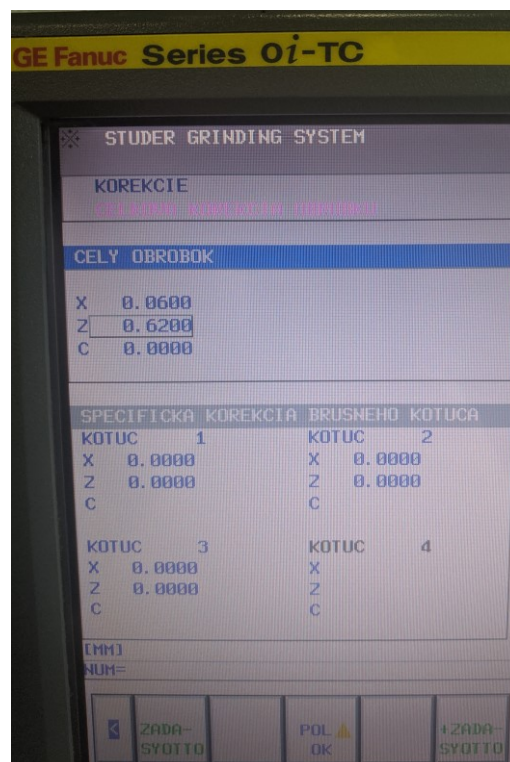
Nejdříve se brousí vnější průměr kusu, poté čelo ze strany koníka a v poslední řadě čelo se zkosení $2 \times 45^\circ$, toto pořadí je klíčové, musíme si uvědomit, že se jedná o kužel, na kterém se to brousí, proto se první čelo brousí ze strany koníka, kotouč na něj vyvíjí tlak, směrem do kužele a tak dochází ještě k pevnějšímu upnutí, přičemž kus se nám může posunout, maximálně o pár tisícín milimetru směrem do kužele. A na druhé čelo také brusný kotouč vyvíjí tlak a má tendenci kus z kuželu sundat, proto se nejdřív brousí díra, aby došlo k lepšímu přilnutí dvou povrchů, kdybychom ale kus upnuli za surovou díru, přilnavost těchto dvou povrchů by nebyla dokonalá a pravděpodobně by se kus zničil nebo napáchal daleko větší škody.

Sundání kusu probíhá obdobně, jako v kapitole 5.3.3 kdy vezmeme tyč odpovídající průměru trnu, který k němu přiložíme a měděným kladivem trn vytlučeme z kleštiny, je potřeba si dávat pozor, abychom nezasáhli kus. Poté kleštinu a trn očistíme a osušíme, aby nám nečistoty nezpůsobily změny v rozměrech, popřípadě nevytvářely zmetky.

Po očištění nový kus nasadíme stejným způsobem a změříme maximální výšku čela, rozdíl těchto výšek poté zadáme do korekce osy Z stroje. Takto brousíme celou zakázku, v průběhu je třeba kontrolovat kusy jak na výšku, házivost na prisma, tak vnější průměr jestli se nachází v tolerančním poli, také je potřeba orovnávat kotouč orovnávačem, v průběhu se kotouč zanele nečistotami z broušení a ztrácí svoje schopnosti, po této operaci je třeba zadat nové korekce, jelikož průměr kotouče se nám po orovnání zmenšil.



Obr. 5.5.21 Měření rozdílu výšek



5.5.22 Zadávání korekce do osy Z stroje

V poslední řadě se kus kontroluje na drsnost povrchu, dle výkresu vnější průměr má drsnost Rz 4, kontrolu provádíme na drsnoměru a snažíme se kus nastavit, aby rameno drsnoměru bylo na nejvyšším položeném bodě.



Obr 5.5.23 Měření drsnosti



Obr. 5.5.24 Výsledná drsnost

5.5.3 Zbytkové operace

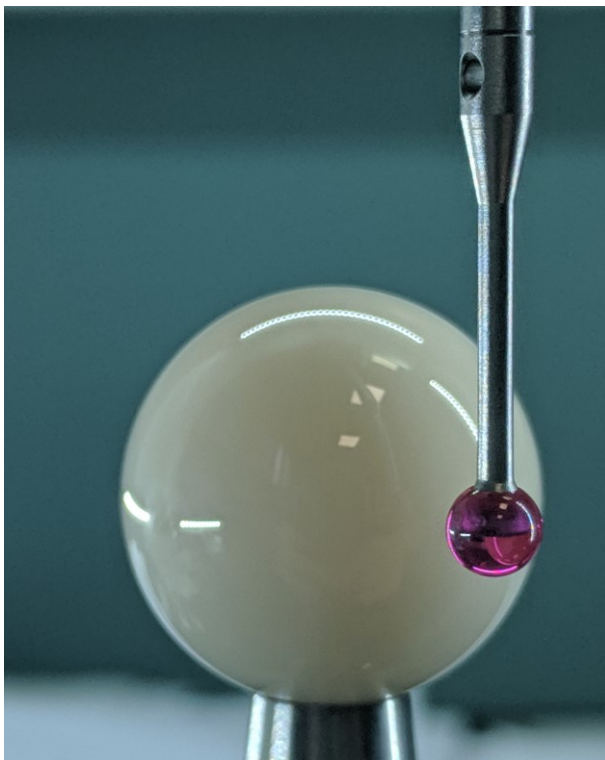
V poslední řadě je třeba dodělat předepsaná zkosení, u keramiky nesmí být ostré hrany, proto všechny hrany, které nemají úhel 45° musí být buď sraženy, nebo zaobleny diamantovou houbičkou, univerzálně se zaoblují na rádius R5.



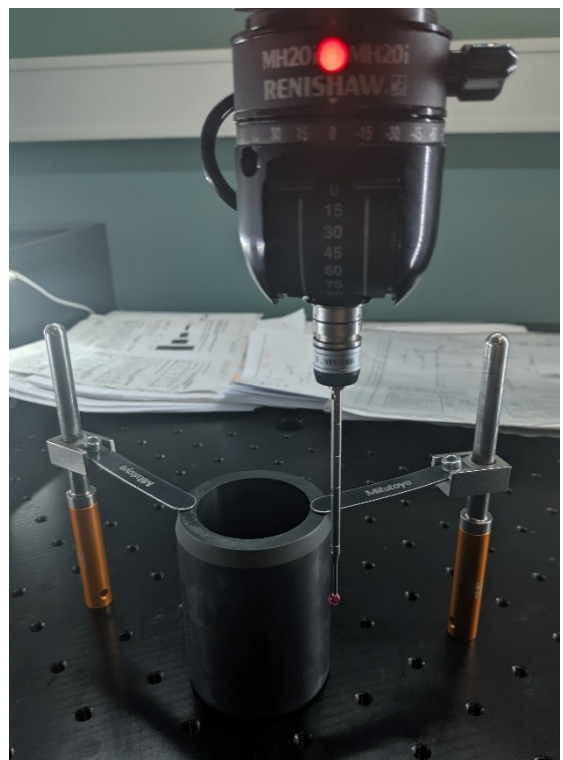
Obr. 5.5.30 Zaoblování hran diamantovou houbičkou

5.5.4 Kontrola rozměrů

Celková kontrola rozměru dle výkresu se prováděla na 3D měřidle Mitutoyo Crysta plus M544, než jsem ale mohl začít měřit, musela se provést modifikace a to změnění délky trnu, jelikož kus má výšku 70 mm, a kvůli tomu se prováděla rekaliibrace doteku kuličky, na kalibrační kuličce o průměru necelých 20 mm. Ve výsledku se zapnula kalibrace a manuálně jsem musel dotekovou kuličkou udělat pět doteků na kalibrační kuličce, konkrétně čtyři na průměru a zbylý pátý na nejvyšším bodě kuličky, přesnost by se měla pohybovat okolo 0,00050 mm, toho se mi podařilo docílit až po 12 pokusu kalibrace. Poté stačilo kus upevnit na podložku a zkontrolovat celý kus, po dokončení kontroly prvního kusu, se napsal program, aby se pro každý kus nemusely ručně vypisovat tolerance.



Obr. 5.5.41 Kontrola rozměru kusu



Obr. 5.5.40 Kalibrace doteku

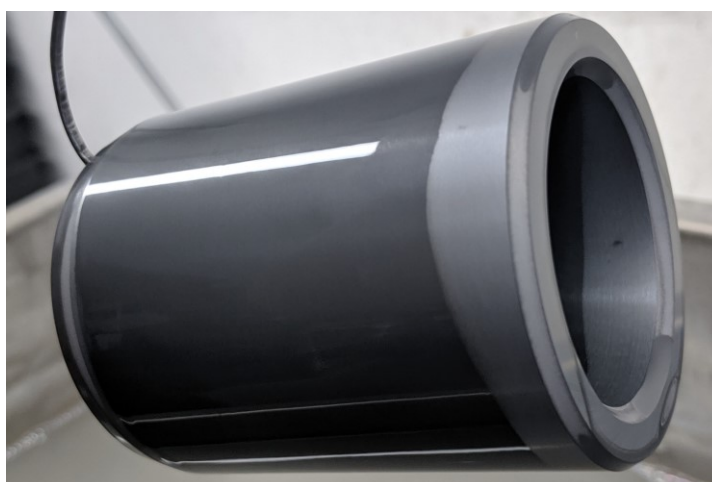
V poslední řadě je potřeba zkontrolovat všechna zkosení, k tomu nám poslouží konturoměr (profiloměr), Rameno pojede po nejvyšším bodě kusu a vykreslí tak profil v podobě čar do softwaru, v něm už jenom stačí vyznačit manuálně body a pomocí funkcí zmapovat všechna zkosení a jejich rozměry.



Obr. 5.6.42 Kontrola profilu kusu na konturoměru Mitutoyo CV - 2100

5.5.5 100% kontrola

V poslední řadě když jsme si jisti správnosti rozměrů kusu, se kusy umývají v ultrazvukové myčce, tam je jistota že zbylé nečistoty, které vznikly při broušení, zmizí, po umytí se kusy pracovníkem vizuálně zkontrolují na nedokonalosti či praskliny, pokud nic závažného neshledá, tak se kusy zabalí do forem a exportují se do Německa.



Obr. 5.5.50 Umývání v ultrazvukové myčce

6 Technicko – ekonomické projednání

V diskuzi experimentu jsem testoval několik technologických postupů, u kterých jsem docílil následujících experimentů.

Broušení v dlouhých čelistech je relativně cenově nenáročné, podmínkou je mít upínací hlavu a vhodné čelisti, navzdory tomu z technické stránky tuto technologii nemohu doporučit, jelikož se jednalo o přesný kus, a proto je toto broušení vhodné pro méně přesné zakázky.

Broušení na přípravku nám přineslo relativně pozitivní výsledky, co se týče rozměrů, nutnost je ale vyrobit přesný přípravek a to jenom pro jednu zakázku, což nám zabere velké množství času a další operace jako vyklepávání kusů na přípravku nám moc nepřidají, ve výsledku bychom měli pro každou podobnou zakázku, samostatný přípravek, což si trůfám říct, že je neekonomické s ohledem na množství spotřebovaného materiálu. Tuto operaci bych doporučil jen tehdy, když už není jiná možnost jak zakázku nabrousit.

Broušení na narážecím trnu nám přineslo podobné výsledky jako předchozí technologický postup, ale s výrazným ušetřením času, i když jsme museli modifikovat stroj na broušení mezi hroty. Podmínkou této technologie je vlastnění sady narážecích trnů, dá se říct, že je to investice do budoucna, jelikož samotná pořizovací cena není malá, ale přinese nám plno výhod, od množství kleštín po roztažení této kleštiny až o 5 mm od původního rozměru, to nám dává plno možností pro broušení podobných tvarových zakázek. Samozřejmě tato technologie nepatří mezi nejpřesnější a má svá omezení, ale pro naše požadavky to plně stačí.

7 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala zvolením vhodného technologického postupu broušení, pro předem vybraný kus. Ze začátku jsme se seznámili s tím, co vlastně technická keramika SiC je, jaké jsou její vlastnosti, výhody a úskalí, poté jsme probírali zásady broušení, jaké jsou technologie a vybrání vhodného brusného nástroje. Pak započal samotný experiment, kde jsme si představili brousicí stroj, na kterém se bude provádět celý experiment a volba vhodných brousících parametrů a brousících kotoučů. V diskuzi experimentu jsem prováděl tři technologické postupy, z nichž dva byly úspěšné a jeden neúspěšný. Ve výsledku jsem jeden z nich aplikoval na zakázku s pozitivním výsledkem. Ve finále jsem provedl psané technicko – ekonomické zhodnocení těchto technologických postupů. Neříkám, že jsem našel ten nejlepší možný postup, ale pro naši zakázku to bohatě stačí, navíc technologie neustále jde dopředu a každým dnem se může objevit nový způsob, daleko lepší co se týče výsledných rozměrů, jednoduchosti obsluhy, ale i cenově výhodnější.

Poděkování

V závěru bych chtěl poděkovat firmě KOVO Dohanlák za umožnění zpracovat bakalářskou práci a firmě KYOCERA FINECERAMICS PRECISION GmbH SELB za poskytnutí experimentálních kusů a možnost provést technologický postup na jedné z jejich zakázek. Dále Ing. Miroslavu Lakomému za odborné vedení a připomínky, technickému specialistovi výroby keramiky Ing. Jürgenovi Ziermannovi KYOCERA FINECERAMICS PRECISION GmbH SELB za poskytnutí literatury a zodpovězení otázek ohledně keramiky, brusiči Jiřímu Honkovi z firmy KYOCERA FINECERAMICS PRECISION GmbH SELB za konzultace ohledně technologického postupu a v neposlední řadě brusičům na stroji STUDER Filipu Kolečkářovi a Radku Šůstkovi, za pomoc při vytváření programů na experimentální broušení.

Použitá literatura

- [1] LAKOMÝ M., *Představení firmy KOVO DOHNALÍK*, prezentace firmy
- [2] VERBAND DER KERAMISCHEN INDUSTRIE E.V. *Breviary technical ceramics*. Selb: Fahner Verlag, Lauf, 2004, 283 s. ISBN 3-924158-57-6
- [3] VERBAND DER KERAMISCHEN INDUSTRIE E.V. *Breviary Technical Ceramics* [online]. 2004 [cit. 2020-24-02] Dostupné z:
http://www.nonmet.mat.ethz.ch/education/courses/Materialwissenschaft_2/brevier.pdf
- [4] ČEP, R. *TECHNOLOGIE II – 2. díl*. Ostrava: Vysoká škola báňská – TU Ostrava, 142 s. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta Technologie II 2dil.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf)
- [5] URDIAMANT. *Brousící kotouče z diamantu a kubického nitridu boru* [online]. 2012 [cit. 2020-03-03] Dostupné z:
<https://www.urdiamant.cz/cs/produkty-a-aplikace/diamantove-a-cbn-brousici-nastroje/diamantove-a-cbn-brousici-kotouce/>

Seznam obrázků

Obr. 2.2 Certifikace dle normy ISO 9001:2015 od firmy DNV GL

Obr. 2.50 Mikrostruktura SSiC (neleptaná) [3]

Obr. 2.51 Hrubozrnná mikrostruktura SSiC (leptaná) [3]

Obr. 2.60 Mikrostruktura SiSiC [3]

Obr. 2.61 Mikrostruktura hrubozrnného SiSiC [3]

Obr. 3.20 Nepravidelný úběr třísky [4]

Obr. 3.21 Úhly jednotlivých zrn brusiva [4]

Obr. 3.22 Ukázka vylamování zrn [4]

Obr. 3.23 Orovnávač na oživení diamantových brusných kotoučů

Obr. 3.30 Obvodové broušení (vlevo) a čelní broušení (vpravo) [4]

Obr. 3.31 Obvodové broušení [4]

Obr. 3.32 Čelní broušení [4]

Obr. 3.40 Broušení s podélným posuvem [4]

Obr. 3.50 Hloubkové broušení [4]

Obr. 3.60 Radiální obvodové broušení vnějších ploch [4]

Obr. 3.70 Axiální broušení vnitřních válcových ploch [4]

Obr. 3.80 Planetové broušení vnitřních válcových ploch [4]

Obr. 4.10 Stroj Studer S33 rok výroby 2008

Obr. 5.1.10 Lepidlo pro upevnění podložek

Obr. 5.1.11 Nastavení čelistí

Obr. 5.1.12 Lepení podložek

Obr. 5.1.20 Zabarvení podložek

Obr. 5.1.21 Před broušením podložek

Obr. 5.1.22 Broušení podložek

Obr. 5.1.30 Broušení prvního čela

Obr. 5.1.40 Broušení díry v dlouhých čelistech

Obr. 5.1.50 Uvolnění imbusových šroubů

Obr. 5.1.51 Korekce házivosti

Obr. 5.1.52 Broušení vnějšího průměru v dlouhých čelistech

Obr. 5.2.10 Broušení čela obrobku

Obr. 5.2.20 Náčrt přípravku

Obr. 5.2.21 Hotový přípravek

Obr. 5.2.22 Kus upevněný na přípravku

Obr. 5.2.30 Kontrola a následná úprava házivosti přípravku na upínací hlavě

Obr. 5.2.40 Vyrovnávání kusu do tolerance 0,02 mm

Obr. 5.1.41 Upnutý kus připraven k broušení

Obr. 5.2.50 Broušení vnějšího průměru na přípravku

Obr. 5.2.60 Broušení vnitřního průměru

Obr. 5.3.10 Sada narážecích trnů včetně kleštin

Obr. 5.3.20 Upínací hlava

Obr. 5.3.21 Sundání hlavy

Obr. 5.3.22 Hrot s unašečem

Obr. 5.3.23 Usazení koníka na stůl a zapojení chladicí kapaliny

Obr. 5.3.30 Upnutí kusu

Obr. 5.3.31 Nastavení nulového bodu

Obr. 5.3.32 Upnutí trnu s kusem mezi hroty do stroje

Obr. 5.3.33 Uvolnění kusu z trnu

Obr. 5.3.34 Měření rozdílu výšek

Obr. 5.3.35 Zadávání korekce do osy Z stroje

Obr. 5.40 Graf znázorňující vliv technologie na házivost kusu během experimentu

Obr. 5.5.10 Broušení díry

Obr. 5.5.11 Měření drsnosti díry

Obr. 5.5.12 Drsnost Rz

Obr. 5.5.20 Upnutí kusu mezi hroty na narážecím trnu

Obr. 5.5.21 Měření rozdílu výšek

Obr. 5.5.22 Zadávání korekce do osy Z stroje

Obr. 5.5.23 Měření drsnosti

Obr. 5.5.24 Výsledná drsnost

Obr. 5.5.30 Zaoblování hran diamantovou houbičkou

Obr. 5.5.40 Kalibrace doteku

Obr. 5.5.41 Kontrola rozměru kusu

Obr. 5.5.42 Kontrola profilu kusu na konturoměru

Obr. 5.5.50 Umývání v ultrazvukové myčce

Seznam tabulek

Tabulka 2.70 Vlastnosti karbidických keramik [2]

Tabulka 4.2.3 Univerzální brousící parametry pro brusku STUDER

Tabulka 5.2.7 Kontrolování kusu

Seznam příloh

Příloha A - Výkres součástí

Příloha B - Kontrola zkosení na konturoměru prvního kusu

Příloha C - Kontrola zkosení na konturoměru patnáctého kusu

Příloha D - Kontrola prvního kusu na 3D měřidle list 1

Příloha E - Kontrola prvního kusu na 3D měřidle list 2

Příloha F - Kontrola patnáctého kusu na 3D měřidle list 1

Příloha G - Kontrola patnáctého kusu na 3D měřidle list 2

Příloha H - Technologický list